

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO

**ESTUDO DE SÉRIES DE LEITURAS OBTIDAS ATRAVÉS DO
MONITORAMENTO DA INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA
IMPLANTADA EM UMA ENCOSTA LITORÂNEA**

CURITIBA

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO

**ESTUDO DE SÉRIES DE LEITURAS OBTIDAS ATRAVÉS DO
MONITORAMENTO DA INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA
IMPLANTADA EM UMA ENCOSTA LITORÂNEA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil com Área de Concentração em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Christopher Morales Kormann

CURITIBA

2013

González Acevedo, Andrés Miguel

Estudo de séries de leituras obtidas através do monitoramento da instrumentação geotécnica implantada em uma encosta litorânea / Andrés Miguel González Acevedo. – Curitiba, 2013.

188 f. : il.; grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil.

Orientador: Alessandro Christopher Morales Kormann

1. Instrumentos de medição. 2. Estabilidade estrutural. 3. Correlação (Estatística) . I. Kormann, Alessandro Christopher Morales II. Título.

CDD: 681.25

TERMO DE APROVAÇÃO

ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO

ESTUDO DE SÉRIES DE LEITURAS OBTIDAS ATRAVÉS DO MONITORAMENTO
DA INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA IMPLANTADA EM UMA ENCOSTA
LITORÂNEA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre
no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de
Concentração: Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do
Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

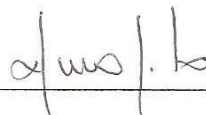


Prof. Dr. Alessandro Christopher Morales Kormann
Universidade Federal do Paraná

Examinadores::



Prof. Dr. Sidnei Helder Teixeira
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Luiz Russo Neto
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Curitiba, 28 de Maio de 2013.

Dedicado aos meus pais.

Dilia Mercedes e Miguel Angel

AGRADECIMENTOS

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela contribuição a minha formação acadêmica.

Ao meu orientador, pela confiança creditada em mim, pelo apoio e direcionamento fundamental para a realização deste trabalho de pesquisa.

A CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos, e ao CNPq, pela oportunidade de desenvolver conhecimentos em novas tecnologias.

Ao grupo de pesquisa e aos companheiros da sala 28 pelo apoio, amizade e ajuda nos momentos chaves.

Aos meus pais, Dilia Mercedes e Miguel Angel; minhas irmãs, Yorane e Grace, obrigado pelo incentivo, compreensão, carinho e apoio dado durante este tempo que estive longe de casa.

A minha namorada e companheira de muitos anos, Yulimar, pela paciência, apoio, carinho e consideração durante a realização deste trabalho.

Aos meus tios Hector e Silvana, os quais me receberam na sua casa para poder realizar este projeto de vida, sempre incentivando e motivando para alcançar as metas propostas.

Aos meus primos Andreize, Christian, Ligie e Daiane, pelo apoio e parceria nesta etapa da vida.

A minha Tia Rosa Elizabeth pelo apoio e incentivo para seguir na área acadêmica, sendo exemplo de muitos logros acadêmicos e paixão pela pesquisa.

Aos meus amigos Rafael e Maria, obrigado pelos conselhos, orientações e correções realizadas.

A todas aquelas pessoas que dedicaram um pouco do seu tempo para escutar, conversar, discutir e opinar sobre os temas abordados neste trabalho.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

A instrumentação geotécnica é uma técnica comumente utilizada para obtenção de variações de parâmetros como poro pressões e deslocamentos de massa do solo. A obtenção destes parâmetros é importante para a compreensão da influência de condicionantes ambientais como, por exemplo, chuvas incidentes, que podem levar a instabilização de uma encosta. Neste trabalho descrevem-se séries de leituras de piezômetros, tensiômetros e inclinômetros, correspondentes à instrumentação para monitoramento do comportamento do solo, assim como de células de carga, *strain gauges* e *crackmeters*, correspondentes à instrumentação do sistema de contenção existente e a série de leituras de um pluviógrafo. Este estudo foi realizado em uma encosta localizada na pista Sul da BR 101-SC no trecho km 140+700m. Nesta análise foram feitas correlações estatísticas para o entendimento da interação entre os instrumentos e análise das relações matemáticas entre os eventos pluviométricos e as leituras obtidas. Para isto foram discretizadas as séries temporais resultantes do monitoramento em valores diários de leitura, permitindo assim validar as correlações. As técnicas de análise estatística utilizadas para realizar as correlações diretas foram utilizadas para explicar parte das dificuldades observadas quanto a valores de leitura em instrumentos. Como resultado desta análise, permitiu-se o entendimento dos processos e mudanças observadas ao longo do monitoramento, certificando a estabilidade da encosta tanto no comportamento do solo como no sistema de contenção instalado.

Palavras-chave: Monitoramento geotécnico, Séries temporais, Análise de correlação.

ABSTRACT

Geotechnical instrumentation is a technique commonly used to obtain variations of parameters such pore-water pressures and mass displacement of the soil. This results are important to understand the influence of environmental conditions such as rainfall incidents, that can lead on slope instability. This work describes the series of readings of piezometers, tensiometers and inclinometers, that correspond to the instrumentation for monitoring the behavior of the soil, as well as load cells, strain gauges and crackmeters that correspond to the instrumentation of the existing retaining system and the serie of readings from a rain gauge. This study was conducted on a hillside in the southbound lane of BR 101-SC in the km 140+700 m. In this analysis, statistical correlations were made to understand the interaction between the instruments and rainfall and to analysis mathematical relations between the rainfall event and the reading obtained. To do this, the resulting time series were discretized to daily readings in order to validate the correlations. The statistical analysis techniques used to perform direct correlations were also used to explain some of the difficulties observed on the values of instruments readings. As a result of this analysis, it was possible to understand the processes and changes observed over the monitoring, certifying the stability of the slope monitored both the behavior of the soil as the contention system installed.

Key-words: Geotechnical monitoring, Time series, Correlation analysis.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	18
1.2 OBJETIVO GERAL	18
1.2.1 Objetivos específicos	18
1.3 JUSTIFICATIVA	19
1.3.1 Justificativa Ambiental	19
1.3.2 Justificativa Social.....	20
1.3.3 Justificativa Econômica.....	21
1.3.4. Justificativa Tecnológica	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA E MONITORAMENTO.	23
2.1.1 Investigação do local	23
2.1.2 Verificação do projeto	23
2.1.3 Segurança.....	24
2.1.4 Execução	24
2.2 INSTRUMENTOS	24
2.2.1 Piezômetros	25
2.2.2 Tensiômetros	28
2.2.3 Inclínômetros.....	29
2.2.4 Células de carga	32
2.2.5 Strain gauges.....	33
2.2.6 Crackmeters.....	34
2.2.7 Pluviógrafo	34
2.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DADOS	36
2.3.1 Análise de séries temporais	36
2.3.1.1 Classificações das séries temporais	37
2.3.1.2 Objetivos da análise de séries temporais.....	38
2.3.1.2.1 Descrição	38
2.3.1.2.2 Predição.....	39
2.3.1.3 Componentes de uma série temporal	39
2.3.1.4 Abordagens.....	40
2.3.2 Correlação Linear	41
2.3.2.1 Coeficiente de correlação linear “r”	41
2.3.2.2 Teste de significância.....	42
2.3.2.3 Teste da hipótese nula $r = 0$	43
2.3.2.4 Teste da hipótese $r = r_0 \neq 0$	43
2.3.3 Diagramas de dispersão	44
2.3.4 Cálculo da correlação direta entre duas séries de leituras de instrumentos	44
2.3.5 Correlação entre as leituras dos instrumentos e a pluviometria do local.....	46
2.3.6 Análise multivariada	49
2.3.6.1 Análise de agrupamentos – AA.....	50
2.3.6.2 Análise fatorial - AF.....	51
2.3.7 Análise de incerteza.....	51
3. ESTUDO DE CASO KM 140+700 M PISTA SUL BR 101.....	54
3.1 LOCALIZAÇÃO	54
3.2 HISTÓRICO	54

3.3. ASPECTOS GEOLÓGICOS	55
3.3.3 Caracterização da Geologia Local	55
3.4 ASPECTOS GEOFÍSICOS	60
3.4.1 Caracterização geofísica.....	60
3.5 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	64
3.6 PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO	67
3.7 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO	69
3.7.1 INSTRUMENTOS	71
3.7.1.1 Piezômetros	71
3.7.1.2 Tensiômetros	72
3.7.1.3 Inclínômetros.....	73
3.7.1.4 <i>Strain gauges</i>	74
3.7.1.5 Células de carga	75
3.7.1.6 <i>Crackmeters</i>	75
3.7.1.7 Pluviógrafo	76
3.7.1.8 Sistema de alimentação de energia.....	77
3.7.1.9 Sistema de aquisição de dados	77
4. MATERIAL E MÉTODOS	78
4.1 COLETA DE DADOS	78
4.2 PERÍODOS ANALISADOS	78
4.3 FREQUÊNCIA DE LEITURA DA INSTRUMENTAÇÃO.	79
4.4 PREPARAÇÃO DOS DADOS.....	80
4.5 AGRUPAMENTO	81
4.6 CRIAÇÃO DE DIAGRAMAS DE FREQUÊNCIA E DISPERSÃO.....	81
5. RESULTADOS.....	85
5.1 ANÁLISE DAS SÉRIES DE LEITURAS PARA A CHUVA.....	85
5.1.1 Pluviógrafo	85
5.2 ANÁLISE DAS SÉRIES DE LEITURAS DE INSTRUMENTOS INSTALADOS PARA MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DO SOLO	94
5.2.1 Piezômetros	94
5.2.2 Tensiômetros	110
5.2.3 Inclínômetros.....	124
5.3 ANÁLISE DAS SÉRIES DE LEITURAS DE INSTRUMENTOS INSTALADOS PARA MONITORAMENTO DO SISTEMA DE CONTENÇÃO.	126
5.3.1 Células de Carga	126
5.3.2 <i>Strain gauges</i>	129
5.3.3 <i>Crackmeters</i>	137
5.4 VALIDAÇÃO DAS LEITURAS E DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	147
5.4.1 Piezômetros	147
5.4.2 Tensiômetros	152
5.4.3 Leituras do pluviógrafo.....	161
5.4.4 Vegetação.....	165
5.4.2 <i>Data logger</i>	166
6. CONCLUSÕES	167
6.1 SUGESTÕES.....	170
APÊNDICE.....	171
PROCEDIMENTOS PARA REALIZAR A COLETA DE DADOS	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	176

ANEXOS180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema para a instalação do piezômetro de tubo aberto	26
Figura 2 - Esquema para a instalação do piezômetro de corda vibrante.	27
Figura 3 - Tensiômetro comercial.....	29
Figura 4 Exemplo dos “cases” ou tubos de inclinômetro com as ranhuras guias.....	30
Figura 5 - Exemplo de torpedo ou sonda de inclinômetro, cabo graduado e unidade leitora.	31
Figura 6 - Imagem ilustrativa da célula de carga marca Geokon.	33
Figura 7 - Imagem do crack meter (elongâmetro) instalado na malha do sistema de contenção.....	34
Figura 8 - Pluviógrafo de caçambas basculantes instalado no local de estudo	35
Figura 9 - Exemplo de agrupamento de leituras com data coincidente	45
Figura 10 - Exemplo de leituras agrupadas em uma única matriz para cálculo de correlação.....	45
Figura 11 - Exemplo de agrupamento de dados para o cálculo de correlação atrasada	47
Figura 12 - Exemplo de agrupamento de dados para o cálculo de correlação atrasada acumulada.....	48
Figura 13 - Diagrama de incertezas na propriedade do solo proposto por Christian & Baecher.....	52
Figura 14 - Localização da área de estudo..	54
Figura 15 - Mapa geológico da região de estudo onde é sinalada a área de estudo no quadrado vermelho	57
Figura 16 - Interpretação geológica do CE 01.....	61
Figura 17 - Interpretação geológica do CE 02.....	61
Figura 18 - Interpretação geológica do CE 03.....	62
Figura 19 - Interpretação geológica do CE 04.....	62
Figura 20 - Interpretação geológica do CE 05.....	63
Figura 21 - Interpretação geológica do CE 06.....	63
Figura 22 - Interpretação da sondagem elétrica vertical SEV 04.	64
Figura 23 - Perfil geológico-geotécnico interpretado a partir das informações das sondagens no Km 140+700m e as seções geofísicas..	65
Figura 24 - Imagens das placas de fixação utilizadas no sistema (esquerda) e das garras de fixação que unem os rolos sobrepostos de malha ao longo do sistema (direita)	68
Figura 25 - Diagrama do sistema de estabilização TECCO®.	68
Figura 26 - Diagrama de monitoramento proposto por Sestrem (2012) para o monitoramento da encosta.....	69
Figura 27 - Croqui de instalação dos instrumentos em planta	70
Figura 28 - Diagrama de colocação dos piezômetros.	72

Figura 29 - Diagrama de dispersão onde se mostra a frequência de oscilação das leituras em quatro piezômetros distintos colocados na mesma faixa de profundidade correspondente a solo não saturado	82
Figura 30 - Diagrama de dispersão para os piezômetros PZE 05 e PZE 06	84
Figura 31 - Diagrama de dispersão para os piezômetros PZE 01 e PZE 05	84
Figura 32 - Diagrama de frequência para as precipitações diárias acumuladas no local de estudo onde assinala-se um período sem leituras devido a problemas com o equipamento.....	86
Figura 33 - Imagem onde pode se observar o entupimento do pluviógrafo	88
Figura 34 - Imagem referencial para localização da estação meteorológica do INMET e o local do estudo.	89
Figura 35 - Diagrama de frequências comparativo entre a estação meteorológica ITAJAÍ-A868 e o pluviógrafo localizado no Morro do Boi	90
Figura 36 - Diagrama de dispersão para valores acumulados diários de precipitações entre o pluviógrafo do Morro do Boi e a estação meteorológica Itajaí A868	90
Figura 37 - Diagrama comparativo entre as precipitações acumuladas mensais para o pluviógrafo do Morro do Boi e a estação meteorológica de Itajaí A868	92
Figura 38 - Diagrama de dispersão para os dados correspondentes à estação meteorológica ITAJAÍ-A868 e o pluviógrafo do Morro do Boi.....	92
Figura 39 - Diagrama de frequências para os piezômetros.....	94
Figura 40 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-01, PZE-02 e PZE-03 localizados na ilha intermediária	95
Figura 41 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-04, PZE-05 e PZE-06 localizados na ilha superior	96
Figura 42 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-01 e PZE-04	97
Figura 43 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-02 e PZE-05	98
Figura 44 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-03 e PZE-06	98
Figura 45 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos com uma frequência de oscilação similar. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 05-PZE 06.....	100
Figura 46 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 02-PZE 05.....	100
Figura 47 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 02-PZE 06.....	101
Figura 48 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 02-PZE 03.....	101

Figura 49 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 03-PZE 05.....	102
Figura 50 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 03-PZE 06.....	103
Figura 51 - Diagrama comparativo entre os valores de coeficientes de correlação para cada período estudado.....	106
Figura 52 - Diagrama de frequência para comparação entre leituras dos piezômetros e ocorrência de precipitações.....	107
Figura 53 - Diagrama de frequência para a família de tensiômetros.....	111
Figura 54 - Diagrama de frequência para os tensiômetro 1 e tensiômetro 2 correspondentes à parte inferior do sistema de contenção.....	112
Figura 55 - Diagrama de frequência para os tensiômetros 3, 4, 5 e 6 pertencentes à ilha localizada no médio do sistema de contenção	113
Figura 56 - Diagrama de frequência para os tensiômetros 7 e 8 localizados na parte superior do sistema de contenção.....	114
Figura 57 - Diagrama de frequência das leituras dos tensiômetros e ocorrência de precipitações acumuladas diárias	116
Figura 58 - Diagrama de frequências para os tensiômetros colocados na ilha inferior e leituras de precipitação acumulada diária	117
Figura 59 - Diagrama de frequências para os tensiômetros colocados na ilha intermediária e leituras de precipitação acumulada diária.....	118
Figura 60 - Diagrama de frequências para os tensiômetros colocados na ilha superior e leituras de precipitação acumulada diária	119
Figura 61 - Diagrama de frequência para as leituras correspondentes ao tensiômetro 3 e precipitações acumuladas diárias	120
Figura 62 - Imagem da vegetação ao redor dos instrumentos colocados na ilha intermediária do sistema de contenção. Na esquerda a imagem antes de ser feita a manutenção e na direita a imagem depois da manutenção na visita a campo para coleta de dados	120
Figura 63 - Diagrama de frequências para tensiômetros instalados a 1,00 m de profundidade e precipitações acumuladas diárias.....	121
Figura 64 - Diagrama de frequência para os tensiômetros instalados a 2,00 m de profundidade e precipitação acumulada diária	122
Figura 65 - Diagrama de frequência para o tensiômetro TENS-04 instalado a 3,00 m de profundidade e precipitação acumulada diária	123
Figura 66 - Gráficos das leituras dos eixos A e B para o inclinômetro 1 e seus deslocamentos acumulados	124
Figura 67 - Gráficos das leituras dos eixos A e B para o inclinômetro 2 e seus deslocamentos acumulados	125

Figura 68 - Diagrama de frequência para as células de carga	126
Figura 69 - Diagramas de frequência para as células de carga e precipitação diária acumulada.....	128
Figura 70 - Diagrama de frequência para o strain gauge SG-08 correspondente à Barra 01	130
Figura 71 - Diagrama de frequência das leituras do strain gauge SG-08 e eventos pluviométricos	130
Figura 72 - Diagrama de frequência para o strain gauge SG-12 correspondente à Barra 02	131
Figura 73 - Diagrama de frequência das leituras do strain gauge SG-12 e eventos pluviométricos	132
Figura 74 - Diagrama de frequência para o strain gauge SG-16 correspondente à Barra 03	133
Figura 75 - Diagrama de frequência das leituras do strain gauge SG-16 e eventos pluviométricos	133
Figura 76 - Diagrama de frequência para o strain gauges SG-04 correspondente à Barra 04	134
Figura 77 - Diagrama de frequência das leituras dos strain gauges SG-04 e eventos pluviométricos	135
Figura 78 - Diagrama de frequência para as leituras do crack meter CRA-01	138
Figura 79 Diagrama de frequência para as leituras do crack meter CRA-01 e as leituras de precipitações acumuladas diárias.....	139
Figura 80 - Diagrama de frequência para a ilha 2 de crackmeters.....	140
Figura 81 - Diagrama de frequência das leituras dos instrumentos colocados na ilha 2 de crackmeters e as leituras de precipitação acumulada diária	141
Figura 82 - Diagrama de frequências para as leituras correspondentes aos crackmeters colocados na ilha 3	142
Figura 83 - Diagrama de frequências para as leituras correspondentes aos crackmeters colocados na ilha 3 e as precipitações acumuladas diárias.....	143
Figura 84 - Diagrama de frequências para as leituras correspondentes aos crackmeters colocados na ilha 4	144
Figura 85 - Diagrama de frequências para as leituras correspondentes aos crackmeters colocados na ilha 4 e as precipitações acumuladas diárias.....	145
Figura 86 - Diagrama de frequência para valores de leituras do PZE-01 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água.....	148
Figura 87 - Diagrama de dispersão para os valores de leituras do PZE-01 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água.....	148
Figura 88 - Diagrama de frequência para valores de leituras do PZE-02 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água.....	149

Figura 89 - Diagrama de dispersão para os valores de leituras do PZE-02 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água.....	150
Figura 90 - Diagrama de frequência para valores de leituras do PZE-03 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água.....	151
Figura 91 - Diagrama de dispersão para os valores de leituras do PZE-02 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água.....	151
Figura 92 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 01	152
Figura 93 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 02	153
Figura 94 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 03	154
Figura 95 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 04	155
Figura 96 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 05	156
Figura 97 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 06	157
Figura 98 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 07	158
Figura 99 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 08	159
Figura 100 - Diagrama de barras onde apresenta-se o acumulado mensal para a estação meteorológica Itajaí A868 durante os meses de novembro e dezembro ...	162
Figura 101 - Diagrama de barra onde se apresentam os eventos reais e calculados para os dados pluviométricos de Morro do Boi	164
Figura 102 - Imagens onde pode ser observado o nível intermediário do sistema de monitoramento com a variação da vegetação. Na esquerda no mês de abril de 2012 e na direita no mês de março de 2013	165
Figura 103 - Vista da janela de interface do software MultiLogger	171
Figura 104 - Vista da janela de início do programa MultiLogger.....	172
Figura 105 - Vista da janela do CR1000_1, onde se pode verificar que o programa esta pronto para realizar a conexão com o <i>data logger</i> e começar a coletar os dados	172
Figura 106 - Vista da janela do programa MultiLogger com conexão ao data logger. Neste desenho pode ser observado os campos onde se encontram os comandos para coleta de dados, modificar intervalos de leitura e a data, e o comando de atualizar as modificações	173
Figura 107 - Descenso até a ilha de instrumentos no médio da encosta com o uso de EPI's e corda de segurança	174

Figura 108 - Detalhe do data logger do pluviógrafo	174
Figura 109 - Informação obtida pelo acionamento do comando “Status” no software do pluviógrafo.....	175
Figura 110 – Imageamento elétrico do CE 01.....	185
Figura 111 – Imageamento elétrico do CE 02.....	185
Figura 112 – Imageamento elétrico do CE 03.....	186
Figura 113 – Imageamento elétrico do CE 04.....	186
Figura 114 – Imageamento elétrico do CE 05.	187
Figura 115 – Imageamento elétrico do CE 06.....	187
Figura 116 – Localização dos caminhamentos elétricos.	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa das características dos tipos de inclinômetros. Fonte: DGSi (2004)	32
Tabela 2 - Características descritas por Basei et al. das rochas na área de estudo Fonte: Basei et al. (2011)	58
Tabela 3 - Composição litogeoquímica de amostras de rochas pertencentes para os granitoides intrusivos do domínio do Grupo Brusque (Suíte intrusiva Nova Trento e Morro do Boi) através de elementos majoritários e traças mediante XRF, ICP-AES, e REE pelo INAA. Fonte: Basei et al. (2011)	59
Tabela 4 - Tabela de caracterização geotécnica correspondente aos ensaios realizados nas amostras do km 140+700 m e km 140+950 m na pista Sul da BR 101-SC.	66
Tabela 5 - Instrumentos colocados para o monitoramento da encosta no km 140+700 m.	71
Tabela 6 - Descrição das características dos piezômetros de corda vibrante Fonte: Adaptado de Sestrem (2012)	71
Tabela 7 - Profundidade de instalação dos piezômetros. Fonte: Adaptado de Sestrem (2012).....	72
Tabela 8 - Descrição das características dos tensiômetros elétricos. Fonte: Adaptado de Sestrem (2012).....	73
Tabela 9 - Profundidade de instalação dos tensiômetros elétricos. Fonte: Adaptado de Sestrem (2012).....	73
Tabela 10 - Características dos tubos para os inclinômetros e profundidade de instalação. Fonte: Adaptado de Sestrem (2012)	74
Tabela 11 - Descrição das características dos strain gauges	74
Tabela 12 - Distribuição dos strain gauges e profundidade de instalação em cada barra instrumentada	75
Tabela 13 - Descrição das características das células de carga.....	75
Tabela 14 - Descrição das características dos crackmeters.	76
Tabela 15 - Descrição das características do pluviógrafo.	76
Tabela 16 Descrição das características do sistema de alimentação de energia.	77
Tabela 17 - Valores de leituras de poro pressões desde a data de início do monitoramento até a data final	82
Tabela 18 - Matriz de correlação (Pearson) para as leituras acumuladas diárias do pluviógrafo do Morro do Boi e a estação meteorológica ITAJAÍ-A868	91
Tabela 19 - Tabela com os dados referentes aos registros de precipitações no pluviógrafo do Morro do Boi e a estação meteorológica ITAJAÍ-A868	91
Tabela 20 - Matriz de correlação (Pearson) para as leituras acumuladas mensais do pluviógrafo do Morro do Boi e a estação meteorológica ITAJAÍ-A868	93
Tabela 21 - Matriz de coeficientes de correlação entre os piezômetros e os eventos pluviométricos	104
Tabela 22 - Matriz de coeficientes de correlação para o primeiro período de leituras	105

Tabela 23 - Matriz de coeficientes de correlação para o segundo período de leituras	105
Tabela 24 - Matriz de coeficientes de correlação para o terceiro período de leituras	105
Tabela 25 - Matriz de coeficientes de correlação obtido para os tensiômetros durante o monitoramento	114
Tabela 26 - Matriz de coeficientes de correlação para as leituras das células de carga	127
Tabela 27 - Matriz de coeficientes de correlação entre as leituras do pluviógrafo e as leituras dos strain gauges das barras instrumentadas	136
Tabela 28 - Matriz de coeficientes de correlação entre a leitura dos crackmeters e o pluviógrafo.....	146
Tabela 29 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-01.....	153
Tabela 30 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-02.....	153
Tabela 31 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-03.....	154
Tabela 32 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-04.....	155
Tabela 33 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-05.....	156
Tabela 34 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do tensiômetro 06.....	157
Tabela 35 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do tensiômetro 07.....	158
Tabela 36 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do tensiômetro 08.....	159
Tabela 37 - Coeficientes de correlação calculados a partir das leituras automatizadas e manuais a partir dos dados coletados nas visitas de campo e o experimento realizado o dia 31 de janeiro de 2013	160
Tabela 38 - Tabela de ocorrência de precipitações acumuladas por mês com todos os valores registrados	162
Tabela 39 - Tabela de ocorrência de precipitações acumuladas por mês com os valores registrados e calculados	163
Tabela 40 – Matriz de coeficientes de correlação	181
Tabela 41 – Matriz de coeficientes de correlação para o primeiro período	182
Tabela 42 – Matriz de coeficientes de correlação para o segundo período	183
Tabela 43 – Matriz de coeficientes de correlação para o terceiro período	184

1. Introdução

As obras de engenharia consideradas como lineares são aquelas que possuem uma de suas dimensões significativamente maior que as demais, como por exemplo: rodovias, linhas de transmissão, oleodutos, entre outras.

Nas rodovias espera-se que sua construção e operação aconteçam de forma segura, assim sendo, o gerenciamento de potenciais riscos ao longo da vida útil destas obras deve ser realizado constantemente por uma equipe de técnicos responsáveis pela segurança destas vias.

Para comunicar os principais centros urbanos e industriais, as rodovias frequentemente atravessam encostas naturais como a Serra do Mar. Estas encostas são na maioria das vezes constituídas por solos de origem coluvionar ou residual e possuem uma dinâmica fortemente influenciada, em relação a estabilidade de suas encostas, por agentes ambientais, dentre os quais pode-se citar as precipitações.

Este trabalho visa gerar conhecimento, mediante o monitoramento de uma encosta litorânea catarinense através de instrumentação geotécnica, sobre a interação entre os fenômenos naturais e as mudanças nas propriedades do solo.

A instrumentação geotécnica fornece dados que ajudam os engenheiros em todas as fases de um projeto. Por este motivo, neste trabalho, a avaliação da influência de fenômenos ou eventos naturais, será baseada em diferentes instrumentos que permitirão o monitoramento das diferentes variáveis envolvidas na ocorrência de deformações e deslocamentos do maciço em estudo.

As variáveis a serem avaliadas serão aquelas que geram alterações significativas na pressão e sucção e as que se relacionam com estes dois últimos nos possíveis deslocamentos horizontais ou verticais.

A dissertação está dividida em seis capítulos. No Capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão sobre instrumentação e monitoramento geotécnico, tipos de instrumentos/sensores e técnicas estatísticas, utilizadas para a análise dos dados gerados a partir desta instrumentação.

No Capítulo 3 a área de estudo é caracterizada primeiramente por uma revisão de trabalhos prévios e posteriormente pela descrição dos aspectos geológico-geotécnicos obtidos através de ensaios de laboratório e campo, realizados no decorrer da pesquisa. Além da apresentação dos instrumentos instalados como resultado do plano de instrumentação implantado por Sestrem, (2012).

O Capítulo 4 descreve o material e os métodos utilizados para o estudo quanto a coleta de dados, períodos analisados, frequências de leituras, preparação e agrupamento dos dados e criação de diagramas de dispersão.

No Capítulo 5 realizou-se a apresentação dos resultados e a análise dos mesmos a partir dos gráficos e diagramas apresentados no Capítulo 4.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas a partir da análise e compreensão das variações nos valores das leituras dos instrumentos e a relação entre estas e a influência da variável “precipitação”. Em seguida são apresentadas as sugestões para próximos trabalhos.

1.1 Problema de pesquisa

Nesta dissertação, o conjunto de variáveis e fatores obtidos através do monitoramento geotécnico, foi tratado, estudado e analisado mediante a técnica de abordagem descritiva de séries temporais. Posteriormente as variáveis foram processadas mediante técnicas estatísticas de correlação linear entre os dados compilados (coletados) através dos instrumentos e sua influência e correlação com as leituras pluviométricas.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral da presente pesquisa consiste em descrever, através da análise estatística dos dados obtidos pela instrumentação geotécnica, as séries de leituras do monitoramento e dos fenômenos naturais envolvidos na estabilidade de encostas, especificamente, no estudo de caso de um trecho da pista Sul da BR-101, no km 140+700m.

1.2.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral desta dissertação, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Fazer a revisão da base de dados obtida a partir da coleta e processamento;
- Discretizar as séries em leituras diárias;
- Realizar diagramas de frequência para observação das variações;
- Realizar diagramas de dispersão para observação das correlações;
- Realizar o processamento estatístico para cálculo de coeficientes de correlação.

1.3 Justificativa

As rodovias são obras de engenharia ligadas ao crescimento da população e ao desenvolvimento das regiões, trazendo para a sociedade uma série de grandes benefícios como são comunicação entre áreas povoadas, zonas urbanas e rurais, acesso a bens e serviços entre outras.

Espera-se que a construção e operação das estradas aconteçam de forma segura, entretanto faz-se necessário contar com um monitoramento constante para evitar que os fatores naturais, que afetam a estabilidade das encostas gerem problemas na segurança da obra e dos usuários.

No Brasil, existem muitos problemas, a nível de rodovias, que envolvem a instabilidade de encostas como fator principal.

Entretanto, este é um problema inevitável visto que a natureza é a maior responsável pela degradação e denudação das rochas, assim como dos solos que compõem a paisagem que nos rodeia. É nessa paisagem (entorno) que os engenheiros e planejadores projetam as obras.

As regiões litorâneas brasileiras, em especial aquelas situadas ao longo da Serra do Mar, apresentam áreas de grande instabilidade natural devido a um conjunto de características que contribuem para o desenvolvimento de processos erosivos e de intemperismo.

Estas áreas se mostram susceptíveis as condições impostas pela natureza tais como altas precipitações, taludes com declividades acentuadas, presença de afloramentos rochosos, redes de drenagem densas assim como impactos antrópicos como construções não planejadas.

1.3.1 Justificativa Ambiental

De maneira geral, as rodovias desde sua concepção até a conclusão das obras, apresentam impactos no meio ambiente que não deveriam deixar de serem considerados.

Quando são realizados os cortes e aterros para atravessar os relevos concernentes ao traçado da rodovia, interfere-se diretamente com a estabilidade do maciço alterando seu equilíbrio natural. Estas alterações nas condições de equilíbrio conjuntamente com o processo natural de decomposição das rochas e o avanço do perfil de intemperismo (degradação) trazem como consequência escorregamentos e movimentos de massa que afetam e alteram o ambiente e ecossistemas.

A análise do comportamento de parâmetros como a sucção e poro pressões nestes tipos de encostas pretende entender como estas são influenciadas pelas precipitações então, poderão ser projetadas soluções preventivas. Algumas soluções preventivas como por exemplo, a instalação de drenos horizontais profundos (DHP's) para rebaixamento do nível freático e diminuição de poro pressões, visariam afetar ou ter menor impacto no ambiente ao inés da instalação de sistemas de contenção que geralmente utilizam concreto o qual impermeabiliza o solo gerando escoamento superficial além de ter impacto no meio ambiente.

1.3.2 Justificativa Social

A sociedade é a principal beneficiária das grandes obras de engenharia em quanto se refere a rodovias.

É através da construção de novas rodovias que novos centros ou polos de desenvolvimento são gerados nos países cujo planejamento do crescimento é projetado a longo prazo.

Em países como França, Alemanha, e particularmente os Estados Unidos o desenvolvimento da economia é precedido pela construção de vias de acesso as regiões a serem desenvolvidas. Isto gera confiança nos investidores e nas massas migratórias que vem uma grande vantagem no fato de ter acesso seguro e fiável a estas regiões. Por isto, a manutenção preventiva destas obras deve ser o mais importante, devido à dependência da sociedade enquanto a seu uso.

Um exemplo a ser tomado em consideração em relação ao impacto na sociedade pode ser observado em um relatório da Defesa Civil (2011), onde pela interrupção da BR-376 consequência dos escorregamentos ocorridos em março de 2011, levou-se à intensa utilização da estrada estadual catarinense Dona Francisca (SC-301), a qual normalmente é utilizada para turismo rural.

A passagem de caminhões pesados pela estrada, além de danificar a pista, inadequada para esse tipo de tráfego, reduziu a velocidade média de deslocamento, na qual um trecho de 100 quilômetros normalmente percorrido em uma hora e trinta minutos transformou-se em um percurso de seis a sete horas e provocou pelo menos três graves acidentes. Estes fatos aconteceram no eixo São Paulo - Rio Grande do Sul, considerada como a região mais desenvolvida do País.

1.3.3 Justificativa Econômica

A interdição das vias por escorregamentos de encostas e taludes geram prejuízos elevados à economia do país, já que muitas das mercadorias de consumo básico, produtos alimentícios perecíveis, produtos de uso pessoal, equipamentos industriais e matéria prima de diversos setores da economia, entre outros transitam diariamente pela malha rodoviária do Brasil.

De acordo com um relatório publicado pela Secretaria dos Portos, no mês de março do ano 2011, as interdições ocorridas devido aos escorregamentos das encostas tanto de vias internas no estado de PR como das vias que o comunicam com o estado SC, foi de grande prejuízo. Neste episódio a interrupção da BR-277 provocou filas de 15 a 20 quilômetros de caminhões carregados de soja, que se dirigiam ao Porto de Paranaguá. Em alguns dias, Paranaguá tinha mais de 20 navios aguardando liberação para atracar. Para ter uma ideia do custo indireto que provoca uma interrupção desta magnitude podemos tomar o exemplo da multa paga pelos exportadores no atraso do cumprimento do prazo de entrega, os quais podem alcançar valores entorno de US\$ 50 mil por dia, sem contar o valor intangível da perda de confiança do mercado internacional do país fornecedor e das perdas associadas aos custos por logística de todas as empresas transportadoras.

1.3.4. Justificativa Tecnológica

O desafio que tem esta pesquisa é monitorar a encosta de modo a se criar conhecimento do comportamento do solo a respeito da influência dos eventos naturais para assim poder adotar técnicas de prevenção que possam ser implementadas em encostas com as mesmas características.

Através desta iniciativa tecnológica poderão ser estabelecidas as bases para o desenvolvimento de novos estudos e a possível obtenção de novos métodos que

permitam prever o comportamento dos solos em declives adjacentes às vias e rodovias principais atuais e futuras.

Uma previsão do comportamento do solo que traga como consequência a geração de soluções oportunas irá trazer benefícios imediatos tanto econômicos como sociais.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão revisadas definições fundamentais assim como as referências bibliográficas relacionadas a experiências similares ou relacionadas ao assunto principal deste estudo.

Inicialmente será desenvolvida a conceitualização da instrumentação geotécnica e monitoramento, instrumentos, e ferramentas ou métodos estatísticos para a análise das séries de dados obtidas a partir do monitoramento da instrumentação.

2.1 Instrumentação geotécnica e monitoramento.

Uma das razões principais para se realizar instrumentações geotécnicas é que, a partir destas, é possível obter-se dados que possam ajudar aos engenheiros nas tomadas de decisão nos diferentes estágios de um projeto.

O uso da instrumentação geotécnica não é simplesmente a seleção de instrumentos, senão um processo de engenharia exaustivo, etapa por etapa, começando com a definição de um objetivo e terminando com a implementação ou aplicação dos dados obtidos. Cada etapa é fundamental para o sucesso ou para o fracasso de todo o programa, e os processos de engenharia envolvem a combinação das capacidades dos instrumentos e das pessoas em realizar a análise (DUNNICLIFF, 1988).

Segundo o DGSII (2004), na estabilidade de taludes, a instrumentação pode ser utilizada para:

2.1.1 Investigação do local, para isto, os instrumentos são utilizados para caracterizar as condições iniciais do local de estudo. Entre os parâmetros mais comuns podem-se encontrar a poro pressão, permeabilidade do solo e estabilidade de taludes ou encostas.

2.1.2 Verificação do projeto, este item refere-se à verificação das suposições do projeto e conferir que o desenvolvimento está sendo como o previsto. Para isto, os dados dos instrumentos da fase inicial do projeto podem revelar a necessidade ou a oportunidade de modificar este nas fases posteriores.

2.1.3 Segurança, a instrumentação pode fornecer aviso antecipado de falhas iminentes, visando dar tempo para a eventual evacuação da área e para implementar medidas corretivas. O monitoramento da segurança exige uma rápida coleta, processamento e apresentação de dados, de modo que as decisões possam ser feitas imediatamente.

2.1.4 Execução, os instrumentos são utilizados para monitorar o desempenho em serviço de uma estrutura. Por exemplo, o controle de parâmetros tais como vazão, poro pressão e deformações podem oferecer uma indicação do desempenho de barragens, da mesma forma, o monitoramento de cargas sobre grampos, ancoragens e movimentos dentro de uma encosta pode oferecer uma indicação do desempenho de um sistema de drenagem ou contenção instalado numa encosta estabilizada.

2.2 Instrumentos

Segundo Dunnicliff (1988), existem duas categorias gerais de instrumentos de medição. A primeira categoria é utilizada para a determinação das propriedades dos solos ou rochas “in situ”, como por exemplo, a resistência, compressibilidade e permeabilidade, normalmente medidas durante a fase de concepção do projeto. A segunda categoria é usada para monitorar o desempenho, normalmente durante a construção ou na fase de operação do projeto, e pode envolver medições de água subterrânea, poro-pressões, tensões totais, deformações, carregamentos ou esforços.

Nesta dissertação poderemos encontrar instrumentos pertencentes à segunda categoria definida por Dunnicliff (1988), que envolve o desempenho na fase de operação do projeto, podendo ser subdividido em três subcategorias:

- instrumentos que monitoram o comportamento do solo quanto a parâmetros como poro pressões, sucção e deformações laterais (piezômetros, tensiômetros e inclinômetros);

- instrumentos que monitoram o comportamento do sistema de contenção quanto a carregamento, esforço, e deformações em estruturas (*strain gauges*, células de cargas, *crackmeters*) e;
- Instrumento que mede o fator ambiental de precipitações (pluviógrafo).

2.2.1 Piezômetros

De acordo com DGSII (2004), os piezômetros são os únicos instrumentos utilizados no monitoramento geotécnico para determinar poro pressões, ou seja, pressões de água no solo. Basicamente existem dois tipos de piezômetros:

- Piezômetros “*standpipe*” ou de tubo aberto
- Piezômetros de diafragma (corda vibrante, pneumáticos e multiníveis).

Os piezômetros “*standpipe*” ou de tubo aberto, também conhecidos como piezômetros de Casagrande, consistem em um elemento de admissão de água poroso (pedra porosa) conectado a um tubo vertical.

Neste sistema, a água entra no tubo vertical pelo elemento de admissão (pedra porosa) que é normalmente selada no furo da escavação a uma profundidade previamente especificada. Dependendo do aumento ou diminuição da pressão de água intersticial, o nível de água irá subir ou descer no interior do tubo (Figura 1).

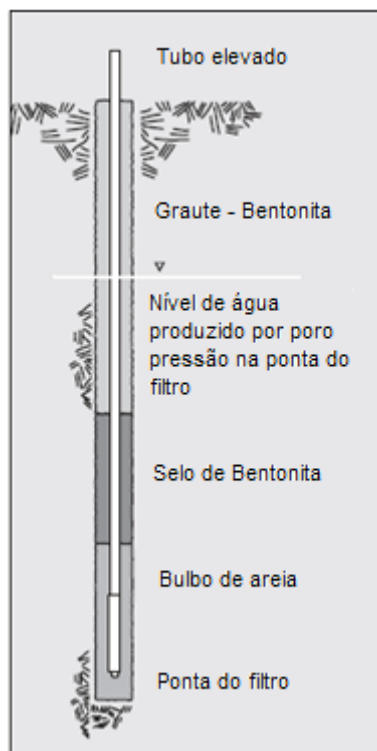


Figura 1- Esquema para a instalação do piezômetro de tubo aberto Fonte: DGSI (2004)

É importante ressaltar que o detalhe básico para o bom desempenho deste tipo de piezômetros é o selo de bentonita localizado sobre a zona de admissão de água. Isto impede que a água de outros estratos entre na zona de admissão, gerando medidas erradas.

As vantagens de se utilizar este tipo de instrumento é que o mesmo mede diretamente o nível de água, não há componentes ou sensores enterrados (DGSI, 2004), apresenta simplicidade construtiva, custos de instalação reduzidos, confiabilidade dos resultados e durabilidade do sistema (SESTREM, 2012).

Como limitações na utilização deste tipo de instrumentos se tem que as leituras requerem acesso direto ao topo do tubo e o prolongado tempo de resposta em solos com baixa permeabilidade.

Os piezômetros de corda vibrante consistem em um diafragma metálico separando a pressão de água do sistema de medição. Um fio tensionado é ligado ao ponto médio do diafragma de forma tal que a deflexão do diafragma causa

mudanças na tensão do fio. As leituras podem ser obtidas com um leitor portátil ou com *data loggers* (DUNNICLIFF, 1988).

De acordo com DGSÍ (2004), o princípio de corda vibrante estabelece que a tensão no fio seja proporcional ao quadrado de sua frequência natural. O piezômetro é projetado de modo que a pressão sobre o diafragma controla a tensão dentro do elemento de corda vibrante. O diagrama para instalação é apresentado na Figura 2.

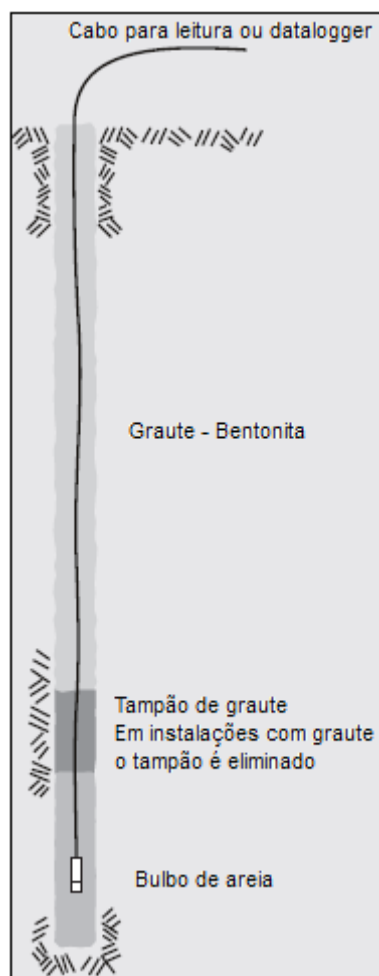


Figura 2 - Esquema para a instalação do piezômetro de corda vibrante. Fonte: DGSÍ (2004)

Quando a unidade de leitura está conectada ao cabo de sinal, esta envia um impulso elétrico a uma bobina que puxa o fio, fazendo-o vibrar na sua frequência natural. Uma segunda bobina capta a vibração e retorna uma leitura de frequência para a unidade de leitura.

Depois de serem obtidas, estas leituras devem ser processadas de acordo com os fatores de calibração para obter unidades de pressão. Isto pode ser realizado automaticamente pela unidade leitora ou pelo processamento no computador.

Entre as vantagens na utilização deste tipo de instrumento, tem-se que fornece respostas rápidas em todos os tipos de solos além de ser adequado para monitoramento autônomo ou automático com o uso de *data logger*.

Entre as desvantagens que apresenta este instrumento temos que o instrumento calibrado fica enterrado, deve ter proteção contra descargas elétricas, ser suscetível a corrosão do elemento (fio) de corda vibrante e que requer instrumentos especializados para se fazer as leituras, aumentando o custo.

2.2.2 Tensiômetros

De acordo com Oliveira (2010) o tensiômetro é um instrumento desenvolvido por Gardner e colaboradores em 1922 o qual consiste de uma cápsula porosa conectada a um manômetro, através de um tubo geralmente de vidro ou PVC, preenchido com água (Figura 3). Utiliza o modelo tensiométrico, o qual fornece de forma direta o potencial ou a tensão (sucção) de água no solo, em unidade de energia dividida por volume (pressão) e de forma indireta a umidade. Indica o estado de energia com que a água está retida nos poros do solo.

A leitura do tensiômetro indica se a água contida no solo está retida com alta ou baixa energia, isto é, em solos secos, a energia de retenção (tensão de sucção) é alta e em solos úmidos a energia de retenção é baixa (OLIVEIRA, 2010).

Sestrem (2012) menciona que os tensiômetros são os instrumentos que representam o método mais comum para a determinação direta da sucção no solo. Isto devido a que a sucção é medida através de uma cápsula porosa que, ao entrar em contato com o solo, proporciona um contato entre a água do solo e a água do equipamento, resultando em um equilíbrio de tensão de sucção.

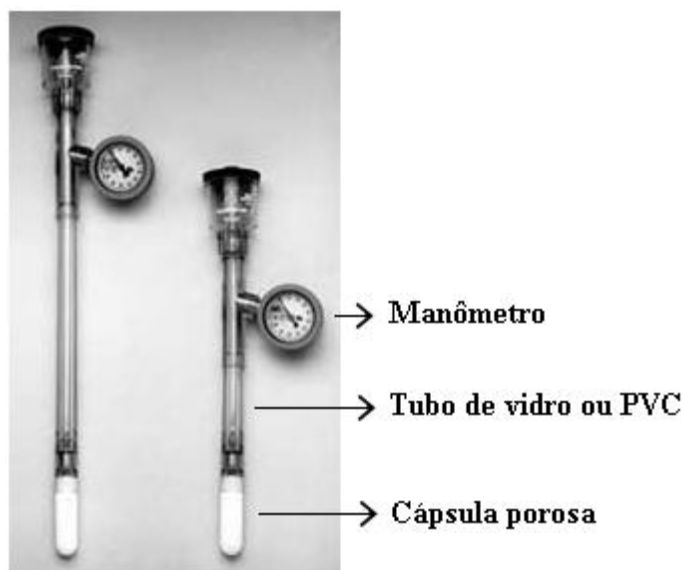


Figura 3 - Tensiômetro comercial. Fonte: Oliveira (2010)

Entre as vantagens que apresenta o instrumento se tem que é de baixo custo e de precisão satisfatória na determinação da tensão de água do solo, além de ser um instrumento adequado para a automatização das leituras e sistemas de monitoramento remoto devido à sua compatibilidade com *data loggers*.

As desvantagens ou limitações que apresenta o instrumento é que é limitado para uso em solos muito argilosos, pois monitora apenas parte da capacidade da água disponível, a capacidade de aplicação é baixa (pouca profundidade), além de apresentar com frequência acúmulo de ar na cavidade da cápsula porosa requerendo assim manutenção frequente.

2.2.3 Inclinômetros

De acordo com o DGS (2004), o inclinômetro é o instrumento primário para o monitoramento de deformações laterais do subsolo.

Dunnicliff (1988) define aos inclinômetros como instrumentos ou dispositivos que permitem o monitoramento da deformação normal do eixo de um tubo por meio de uma sonda tipo torpedo que passa ao longo deste. A sonda contém um transdutor de sensor de gravidade (acelerômetro) desenhado para medir a

inclinação com respeito à vertical. O tubo pode ser instalado tanto em um furo de sondagem como durante o alteamento de um aterro. Em muitas aplicações é instalado com um alinhamento o mais perto à vertical com a finalidade de que forneça dados para definir deformações horizontais subsuperficiais.

De acordo com Dunnicliff (1988), os inclinômetros são aplicados geralmente para determinar a zona de movimento em um deslizamento, monitorar a extensão e a taxa de movimentos horizontais de barragens de terra, aterros sobre solos moles, deformações ao longo de escavações a céu aberto ou túneis e monitorar a deflexão de estacas ou paredes de retenção.

A maioria dos sistemas de inclinômetros apresentam quatro componentes principais:

- Um tubo guia, instalado permanentemente no local de observação, podendo ser feito de plástico, fibra de vidro, alheação de alumínio ou aço. Este tubo guia apresenta canais os quais controlam a orientação da sonda (torpedo) e fornece uma superfície a partir da qual podem ser obtidas repetidas medições (Figura 4).

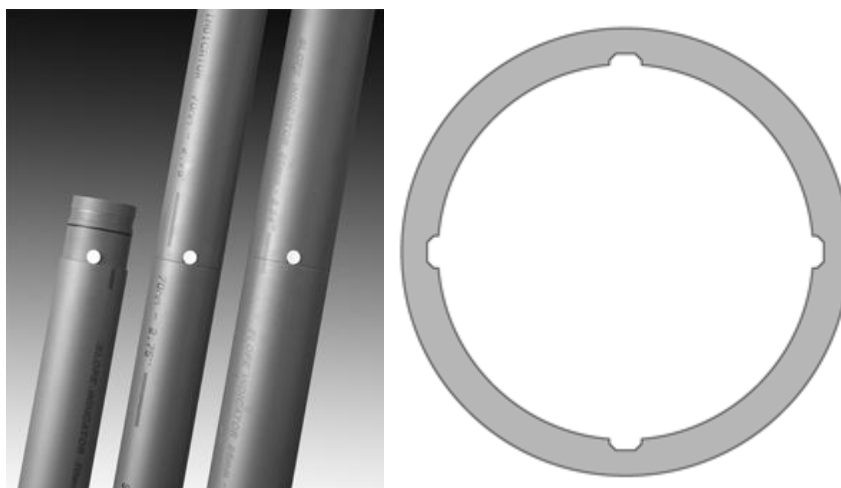


Figura 4 Exemplo dos “cases” ou tubos de inclinômetro com as ranhuras guias. Fonte: DGSI (2004)

- Uma sonda portátil a qual contém o acelerômetro
- Uma unidade leitora portátil para fonte de alimentação de energia e leitura das medições da sonda
- Um cabeamento elétrico graduado que conecta a sonda com a unidade leitora (Figura 5).



Figura 5 - Exemplo de torpedo ou sonda de inclinômetro, cabo graduado e unidade leitora.
Fonte: DGSI (2004)

Existe no mercado outro tipo de sistema de inclinômetros que são instalados quando é requerido um monitoramento contínuo. Este sistema consiste em um ou mais sensores conectados a um *data logger*. Os sensores são colocados em zonas onde a deformação é considerada como provável. Para isto pode ser utilizado previamente uma sonda portátil no intuito de determinar tais zonas (DGSI, 2004).

De acordo com o DGSI (2004), tem-se uma comparação entre o sistema de sonda passante e o sistema de sensores fixos, com respeito aos critérios mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tabela comparativa das características dos tipos de inclinômetros. Fonte: DGSi (2004)

	Sonda passante	Sensor Fixo
Perfil completo	Sim	Não
Tempo de leitura	Aprox. 45 min. c/ 30 m.	Segundos
Acesso remoto	Não	Sim
Data Logging	Não	Sim
Principais vantagens	Via mais econômica para monitorar varias instalações	É a única maneira de obter leitura em tempo real de maneira remota
Principais limitações	O equipamento de leitura e o cabeamento são pesados. Demora muito tempo para fazer a leitura	O cabeamento deve estar protegido de descargas elétricas
Custos de instalação	O furo para o tubo do inclinômetro é o custo principal de instalação	Além do furo para a instalação do tubo, os sensores e o sistema de <i>data logger</i> são dispendiosos.
Custos de operação	O principal custo é enviar um técnico para fazer as leituras	Os custos de operação são baixos.

2.2.4 Células de carga

De acordo com Dunnicliff (1988), as células de carga, também chamadas de “dinamômetros”, são instrumentos que medem carga em estruturas. Geralmente são interpostos nas estruturas de tal maneira que as forças estruturais passem através destas.

Semelhante aos demais instrumentos, as células de carga disponíveis no mercado podem ser do tipo mecânica, hidráulica, de resistência elétrica e de corda vibrante. Na Figura 6 apresenta-se um exemplo de célula de carga correspondente ao tipo corda vibrante.

As células de carga de corda vibrante apresentam dentro de suas características a possibilidade de automação das leituras através de *data loggers*

sem interferência quanto ao comprimento da fiação de instalação devido a que as leituras obtidas são em frequência (Sestrem, 2012).



Figura 6 - Imagem ilustrativa da célula de carga marca Geokon. Fonte: Sestrem (2012)

2.2.5 Strain gauges

Segundo Dunnicliff (1998), os *strain gauges* são instrumentos que medem os esforços em estruturas. Estes são diretamente anexados à superfície da estrutura ou embutidos dentro destas para detectar as extensões ou compressões do elemento estrutural.

Os *strain gauges* são utilizados onde as células de carga não podem ser interpostas por razões de geometria, capacidade ou economia, e onde a carga e as tensões podem ser calculadas com a acurácia adequada com base no conhecimento da relação entre esforço e tensão (DUNNICLIFF, 1988).

O uso destes instrumentos têm sido adaptado para geotecnia no intuito de aprimorar os conhecimentos sobre o comportamento das estruturas de reforço que ficam enterradas no solo. Como exemplo, pode citar-se a Lima (2007) que utilizou *strain gauges* para medir a deformação superficial em pontos específicos de grampos instrumentados. Nesse estudo foram colados os instrumentos na fase superior das barras de aço com o objetivo de avaliar a distribuição dos esforços axiais ao longo do comprimento do reforço durante o programa de monitoramento.

Através dessas observações puderam ser analisadas as variações de esforços de tração ao longo do tempo.

2.2.6 Crackmeters

Os *crackmeters*, ou também chamados de alongômetros, são instrumentos que medem deslocamentos. Frequentemente são utilizados como medidores de aberturas em juntas de construção de edifícios, pontes, barragens, entre outros.

De acordo com Sestrem (2012) a utilização deste tipo de instrumento foi concebida para determinar os movimentos e consequente deformação da malha metálica de contenção, devido à sua precisão, flexibilidade de instalação e adaptação à superfície de fixação porém, seu uso não é convencional na instrumentação em taludes (Figura 7).



Figura 7 - Imagem do crack meter (elongômetro) instalado na malha do sistema de contenção
Fonte: Sestrem (2012)

2.2.7 Pluviógrafo

O pluviógrafo é um equipamento capaz de registrar automaticamente os dados de chuva em função do tempo de ocorrência, possibilitando medir a quantidade de chuva, tempo de duração e portanto sua intensidade (SESTREM, 2012).

Entre os diferentes modelos de pluviógrafos disponíveis, um dos quais se destaca pelo amplo uso é aquele que tem como princípio de medição as caçambas basculantes.

O modelo de caçambas basculantes é formado por uma peça com duas caçambas, arranjadas de tal modo que, quando uma de elas se enche, o peso da água a faz tombar e coloca em posição a outra para encher. Cada tombamento equivale a 0,25 mm de água. Esta medida depende do fabricante, mas em geral é a medida padrão (Figura 8).



Figura 8 - Pluviógrafo de caçambas basculantes instalado no local de estudo

2.3 Técnicas de análise de dados

De acordo com Fasso e Pezzetti (2007) os dados de monitoramento muitas vezes apresentam uma quantidade de informação que nem sempre é fácil de discriminar e entender. Cada fenômeno e parâmetro que podem ser medidos estão sujeitos a influência “externa” de outro fenômeno ou parâmetros os quais podem ser conhecidos ou desconhecidos e ainda podem ter grande influência nos dados a serem considerados.

Entre as técnicas de análise de dados que podem ser utilizadas para maior entendimento das leituras e as correlações entre os distintos instrumentos instalados, encontram-se:

- Análise de séries temporais
- Análise multivariada

2.3.1 Análise de séries temporais

Uma série temporal é definida como um conjunto de observações ordenadas de uma variável recolhidas sequencialmente no tempo. Estas observações são geralmente coletadas em intervalos regulares durante um período específico (LATORRE, M.R.D.O. e CARDOSO, M.R.A. 2001).

A característica fundamental das séries temporais é que as observações sucessivas não são independentes entre si e a análise deve ser feita tendo em consideração a ordem temporal das observações. Nas séries temporais não são válidos aqueles métodos estatísticos baseados na independência das observações, pois num instante de tempo as grandezas dependem dos valores da série no passado (MARIN, 2004).

De acordo com Ehlers (2009) a característica mais importante deste tipo de dados é a condição de dependência das observações vizinhas e o principal interesse do estudo é analisar e modelar esta dependência. As séries temporais quando comparadas com outros tipos de análise apresentam a condição de que a ordem dos dados deve ser respeitada, sendo este um fator crucial.

Segundo Villwock (2009) as pesquisas dedicadas à análise de agrupamento de séries temporais são relativamente escassas em comparação com dados estáticos, no entanto, parece haver uma tendência em aumentar esta atividade.

Guilart (2007) descreve que existem duas formas de estudar séries temporais. Uma destas baseia-se no método para compreendê-la buscando entender a estrutura que gera a série. A outra procura construir um modelo matemático a partir do qual seja possível prever valores futuros da série.

2.3.1.1 Classificações das séries temporais

De acordo com Ehlers (2009) uma série temporal pode ser classificada como:

- Série temporal discreta

Uma serie temporal é dita ser discreta quando as observações são feitas em tempos específicos, geralmente equiespaçados. As séries temporais de dados naturais são geralmente discretas, e igualmente espaçadas no tempo. Este tipo de série é o mais utilizado visto que simplifica muito a matemática que suporta os modelos.

- Série temporal contínua

A série temporal contínua apresenta-se quando as observações são feitas continuamente no tempo. Estas séries podem ser discretizadas em intervalos iguais. Os dados contínuos podem dar origem a dados horários, diários, e mensais e são calculados pela média dos dados contínuos observados tornando a série em discreta. Um exemplo da discretização de séries contínuas encontra-se nas medições de precipitações as quais se apresentam de forma contínua durante o período de ocorrência e geralmente são acumuladas para fazer modelos diários ou mensais facilitando os cálculos e as correlações.

- Série temporal multivariada

Uma série temporal é dita multivariada quando várias séries correlacionadas devem ser analisadas conjuntamente através da obtenção de um vetor de observações em cada tempo.

- Série temporal determinística

As séries temporais determinísticas são descritas como aquelas séries que podem ser perfeitamente modeladas por uma função polinomial tendo como consequência que a observação futura pode ser prevista com exatidão.

- Série temporal estocástica

Uma série temporal é dita estocástica quando segue um modelo não determinístico, ou seja, quando não se pode prever com exatidão as observações futuras e elas podem ser descritas somente em termos de distribuição de probabilidade.

2.3.1.2 Objetivos da análise de séries temporais

Na análise de séries temporais vários objetivos podem ser considerados, entre os principais estão:

2.3.1.2.1 Descrição

De acordo com Ehlers (2009), quando se estuda uma série temporal, primeiramente deve-se desenhar a série e considerar as medidas descritivas básicas. Esta descrição possibilita a compreensão do mecanismo da série e para isto, tem que ser considerado:

- Se os dados apresentam forma crescente ou decrescente (tendência);
- Se existe influência de certos períodos de qualquer unidade de tempo (estacionaridade);
- Se existe variação sazonal ou cíclica;
- Se aparecem *outliers* (observações estranhas ou discordantes).

2.3.1.2.2 Predição

A projeção futura dos valores observados de uma série e suas consequências ou resultados determina o que pode ser chamado de predição. A mesma pode ser feita quando os valores observados de uma série podem explicar o passado e prever o comportamento futuro destas observações (MARIN, 2004). Predizer o futuro possibilita:

- Fazer planos a longo, médio e curto prazo;
- Tomar decisões apropriadas

Ehlers (2009) menciona que quando é realizada a predição assume-se que o futuro envolve incertezas, ou seja, que as previsões não são perfeitas.

2.3.1.3 Componentes de uma série temporal

Uma série temporal ou histórica pode ser composta por três componentes não observáveis. No enfoque descritivo prevê-se encontrar componentes que correspondam uma tendência de longo prazo, um comportamento sazonal e uma variação aleatória denominada ruído branco (LATORRE, M.R.D.O. e CARDOSO, M.R.A. 2001).

Tendência (T_t)

A tendência indica o comportamento da série em longo prazo, ou seja, se a série aumenta, diminui ou permanece estável ao longo do tempo e qual é a velocidade destas mudanças (CARVALHO, 2005).

Sazonalidade (S_t)

A sazonalidade corresponde as oscilações de subida e de queda que ocorrem sempre em um mesmo período (CARVALHO, 2005).

De acordo com Latorre e Cardoso (2001) a sazonalidade é um componente da série histórica difícil de ser estimada, pois é necessário compatibilizar a questão conceitual do fenômeno em estudo com a questão estatística.

Ciclos

Os ciclos indicam as oscilações de subida e de queda nas séries, de forma suave e repetida, ao longo da componente de tendência, como por exemplo, os ciclos meteorológicos (CARVALHO, 2005).

Variação aleatória (a_t) ou ruído branco

De acordo com Bezerra (2006) o ruído branco é uma sequência de variáveis aleatórias independente, identicamente distribuídas $\{a_t\}$. Muitos processos podem ser construídos a partir do ruído branco e pode-se verificar facilmente que a sequência $\{a_t\}$ é estritamente estacionária.

2.3.1.4 Abordagens

De acordo com Ehlers (2009) entre as abordagens que podem ser apresentadas na análise de séries temporais encontram-se:

- Técnicas descritivas. Técnicas gráficas, identificação de padrões, etc;
- Modelos probabilísticos. Seleção, comparação e adequação de modelos, estimação, predição. Neste item a ferramenta básica é a função de autocorrelação;
- Análise espectral;
- Métodos não paramétricos (alisamento ou suavização);
- Outras abordagens. Modelos de espaço de estados, modelos não lineares, séries multivariadas, estudos longitudinais, processos de longa dependência, modelos para volatilidade, etc.

2.3.2 Correlação Linear

De acordo com Andriotti (2003), se quando duas variáveis são estudadas e se verifica que existe uma correspondência entre os valores baixos, intermediários e elevados destas, pode-se supor que exista entre elas certa relação. Uma das maneiras de verificar se essas duas variáveis apresentam relação é se ao plotar os valores num sistema de eixos perpendiculares, os pontos obtidos se dispõem nas proximidades de uma reta. Neste caso, pode-se concluir que entre estas duas variáveis exista uma correlação linear.

Segundo Buzzi (2007) é possível determinar, de modo qualitativo, quão precisamente certa função pode representar a relação existente entre duas variáveis.

2.3.2.1 Coeficiente de correlação linear “r”

De acordo com Andriotti (2003), o coeficiente de correlação linear é uma medida da intensidade da relação linear entre duas variáveis. Este coeficiente também chamado Momento-Produto de Pearson, é utilizado para medir o grau de relacionamento linear entre os dados emparelhados das variáveis X e Y em uma amostra.

Triola (2008) descreve que ao ser feita a análise do coeficiente “r” obtido e o mesmo encontrar-se próximo de zero (0), não há correlação estatística significativa entre X e Y, ao contrário dos casos onde “r” se encontra próximo de -1 ou de +1, que se considera uma correlação muito forte.

Andriotti (2003) observa que no momento de realizar a interpretação do coeficiente de correlação linear deve-se ter cuidado, visto que por ser uma interpretação puramente matemática, não implica a existência de causa e efeito. Porém, a relação precisa ser corroborada por um conhecimento da situação estudada.

A variância total de X e Y é representada pelo valor de r^2 e pode ser explicada pela sua relação linear, calculando-se pelas equações a seguir:

$$r^2 = \frac{\text{variância explicada}}{\text{variação total}} \quad (01)$$

$$r^2 = \frac{(\text{variação total} - \text{variação não explicada})}{\text{variação total}} \quad (02)$$

Pode-se entender então que “ r^2 ” é a proporção da variação total em Y, explicada pelo ajuste da regressão. Este valor também é denominado coeficiente de determinação (ANDRIOTTI, 2003).

O valor de “ r^2 ” representa o grau de dependência de Y em relação a X. Isto significa que se “ r^2 ” varia entre 0 e 1, a variação total não explicada seria a diferença entre 1 e “ r^2 ”.

Andriotti (2003) estabelece que quando a variação não explicada for elevada, ou seja, se a variação explicada for baixa, “ r^2 ” será um valor pequeno, e, quando a dispersão em torno da reta de regressão for pequena em relação à variação total dos valores de Y em torno de sua média, significa que a variação explicada responde por alto percentual da variação total, e “ r^2 ” será próximo de um.

2.3.2.2 Teste de significância

O coeficiente de correlação linear deve ser testado com respeito do seu nível de significância, havendo tabelas com valores críticos para este coeficiente, nas quais se utiliza como graus de liberdade o valor (n-2), sendo “n” o número de observações.

Para poder afirmar que a associação entre as variáveis é significativa, o valor de “r” calculado anteriormente deve ser maior que o valor tabelado para o nível de significância respectivo. Este teste é baseado na premissa da normalidade das duas variáveis envolvidas.

O fato de que as variáveis X e Y não apresentem uma correlação linear significativa, não implica que não estejam correlacionadas de outra forma. Por isso, é aplicada uma técnica de distribuição estatística, denominada teste t ou “t de Student”, para realizar esta correlação, e vem expressada pela equação:

$$t = \frac{(r)}{\sqrt{\frac{(1-r^2)}{(n-2)}}} \quad (03)$$

ou,

$$t_{calc} = \frac{r \sqrt{(n-2)}}{\sqrt{(1-r^2)}} \quad (04)$$

2.3.2.3 Teste da hipótese nula $r = 0$

Este teste é usado quando se quer verificar se o coeficiente de correlação amostral obtido difere significativamente de zero (0). Se não difere, ou seja, se $r = 0$, não há correlação significativa. Para isto se compara o resultado da equação anterior com o valor tabelado, como se apresenta a continuação:

$$t_{calc} = \frac{r \sqrt{(n-2)}}{\sqrt{(1-r^2)}} \sim t_{(n-2)} \quad (05)$$

2.3.2.4 Teste da hipótese $r = r_0 \neq 0$

Segundo Buzzi (2007) este teste é usado para verificar a hipótese de que a correlação “r” seja igual a um suposto valor “ r_0 ”, para isso utiliza-se a estatística dada pela equação 6, denominada transformação Z de Fisher

$$Z = \frac{1}{2} \log_e \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad (06)$$

Onde $e=2,71828...$, tem uma distribuição aproximadamente normal, com a média e o desvio padrão calculado pelas equações 7 e 8 respectivamente

$$\mu_2 = \frac{1}{2} \log_e \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad (07)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{n-3}} \quad (08)$$

De acordo com Buzzi (2007) as equações mencionadas anteriormente (6, 7 e 8) podem também ser utilizadas para encontrar limites de confiança para o coeficiente de correlação.

Estas também são utilizadas para determinar se dois coeficientes de correlação estimados, r_1 e r_2 , tirados de amostras de tamanhos n_1 e n_2 , respectivamente, diferem significativamente entre si, ou seja, para testar a hipótese nula $H_0: r_1 = r_2$.

2.3.3 Diagramas de dispersão

Segundo Fusaro (2007), os diagramas de dispersão são gráficos de dados emparelhados (X, Y) que podem ser utilizados para verificar padrões e correlações entre variáveis, sendo sua interpretação algo subjetiva.

Estes diagramas de dispersão podem ser utilizados na análise preliminar dos dados da instrumentação, de forma que permita a seleção dos componentes a serem introduzidos nos modelos estatísticos.

2.3.4 Cálculo da correlação direta entre duas séries de leituras de instrumentos

De acordo com Buzzi (2007) para realizar a análise da correlação entre duas séries de leituras de instrumentos deve-se tomar as leituras correspondentes à mesma data a fim de considerar como válida a comparação.

Esta análise é feita agrupando as leituras de datas coincidentes por instrumento em uma matriz única e a partir desta matriz calculam-se as correlações. O agrupamento é exemplificado na Figura 9 onde podem observar-se as leituras correspondentes à mesma data em linhas coloridas e logo na Figura 10 a matriz de dados agrupados.

Após o agrupamento dos dados, se obtém um número “n” de amostras dos dois instrumentos a serem analisados, onde se toma um valor x_i o qual representa uma leitura do instrumento X, y_i representando uma leitura do instrumento Y, \bar{x} representando a média aritmética das leituras do instrumento X e \bar{y} representando a média aritmética do instrumento Y.

JSF51	9/1/1996	-2565	535		JSF52	12/3/1996	-23	-60
JSF51	5/2/1996	-2567	522		JSF52	11/6/1996	-32	-40
JSF51	12/3/1996	-2565	505		JSF52	10/9/1996	-58	-7
JSF51	16/4/1996	-2571	505		JSF52	9/12/1996	-47	-41
JSF51	14/5/1996	-2551	530		JSF52	11/3/1997	-35	-50
JSF51	11/6/1996	-2571	545		JSF52	16/6/1997	-32	-35
JSF51	9/7/1996	-2552	598		JSF52	16/9/1997	-47	-42
JSF51	12/8/1996	-2579	615		JSF52	5/12/1997	-43	-55
JSF51	10/9/1996	-2580	640		JSF52	17/3/1998	-33	-57
JSF51	15/10/1996	-2574	591		JSF52	15/6/1998	-36	-37
JSF51	12/11/1996	-2550	561		JSF52	14/9/1998	-53	-37
JSF51	10/12/1996	-2566	550		JSF52	9/12/1998	-40	-50
JSF51	18/2/1997	-2566	505		JSF52	16/3/1999	-33	-42
JSF51	11/3/1997	-2559	511		JSF52	15/6/1999	-36	-33
JSF51	15/4/1997	-2571	529		JSF52	13/7/1999	-44	-37
JSF51	12/5/1997	-2565	515		JSF52	14/9/1999	-65	-22
JSF51	16/6/1997	-2579	559		JSF52	7/12/1999	-59	-33

Figura 9 - Exemplo de agrupamento de leituras com data coincidente Fonte: Buzzi (2007)

	JSF51_1	JSF52_2	JSF51_2	JSF52_2
12/3/1996	-2565	505	-23	-60
11/6/1996	-2571	545	-32	-40
10/9/1996	-2580	640	-58	-7
11/3/1997	-2559	511	-35	-50

Figura 10 - Exemplo de leituras agrupadas em uma única matriz para cálculo de correlação Fonte: Buzzi (2007)

Logo após obter os dados acima descritos, emprega-se a equação 9, com a qual se calcula o coeficiente de correlação amostral entre os instrumentos X e Y.

$$\hat{\rho}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})(Y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2}} \quad (09)$$

Uma vez resolvida a equação 9, analisa-se se a correlação obtida entre os instrumentos denominados X e Y difere significativamente diferente de zero. Para isso, são estabelecidas duas hipóteses, de acordo com as definições descritas nos itens 2.3.1.5.3 e 2.3.1.5.4.

H_0 : Hipótese nula = Hipótese sobre a qual se deve obter evidências para rejeitar.

H_1 : Hipótese alternativa = Hipótese sobre a qual se deve obter evidências para aceitar.

Após verificação das hipóteses, utiliza-se a equação 10 correspondente à distribuição “t de student”, com $(n-2)$ graus de liberdade, para testar a hipótese de ausência de correlação nula ($p=0$).

$$T = \frac{\hat{\rho}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{\rho}^2}} \quad (10)$$

2.3.5 Correlação entre as leituras dos instrumentos e a pluviometria do local

A precipitação pluviométrica é a principal causa da instabilidade de taludes devido a infiltração da água no solo visto que aumenta a poro pressão o que diminui as tensões efetivas, com a diminuição da sucção, tendo como consequência a ruptura das encostas.

De acordo com Buzzi (2007) a correlação entre as leituras dos instrumentos e a variável ambiental pode ser feita similarmente ao item anterior, com base na coincidência das leituras.

Para realizar esta correlação deve ser tomado em consideração que as respostas dos instrumentos não são imediatas ao evento pluviométrico, visto que o tempo que os instrumentos tardam em produzir uma resposta ao evento pode ser diferente para cada um em particular.

As leituras obtidas no decorrer do tempo poderão ser relacionadas em períodos onde o acúmulo destes eventos pluviométricos por vários dias consecutivos poderão gerar condições de instabilidade e assim descrever como estes eventos influenciam nas leituras da instrumentação.

Crítérios para estas análises podem ser encontradas no estudo realizado por Buzzi (2007), onde se aplicam estes conceitos para a correlação entre as leituras dos instrumentos e a temperatura como variável ambiental.

O primeiro passo é a verificação da influência da variável ambiental em dias anteriores com respeito às leituras dos instrumentos de monitoramento do solo através da observação de dois aspectos descritos a seguir:

a) Correlação entre a leitura do instrumento e a ocorrência de precipitações de dias passados:

Para ser observado este aspecto, deve-se verificar a correlação entre a leitura de um instrumento e a ocorrência de precipitações em dias anteriores a essa leitura. Para este propósito, devem ser geradas matrizes com as leituras do instrumento a ser analisado e, para cada leitura (dia), somam-se as leituras de pluviometria de dias anteriores (Figura 11).

Leituras JSF51			Leituras Temperaturas				Matriz Agrupada								
...			
5/2/1996	-2567	522				2/2/1996	21,2	25,7	31,8		-2567	522	23,5	27,2	31,0
12/3/1996	-2565	505				3/2/1996	23,7	25,5	27,8		-2565	505	21,9	26,4	31,6
16/4/1996	-2571	505				4/2/1996	23,5	27,2	31,0		-2571	505	23,5	26,1	30,0
14/5/1996	-2551	530				5/2/1996	20,2	25,0	31,0		...	...	...	...	...
11/6/1996	-2571	545				6/2/1996	18,5	24,9	31,0						
9/7/1996	-2552	598				...	...	...	...		
12/8/1996	-2579	615				9/3/1996	21,6	27,2	33,6						
10/9/1996	-2580	640				10/3/1996	23,6	26,9	33,6						
15/10/1996	-2574	591				11/3/1996	21,9	26,4	31,6						
12/11/1996	-2550	561				12/3/1996	21,8	26,9	32,0						
10/12/1996	-2566	550				13/3/1996	20,0	24,4	31,0						
18/2/1997	-2566	505				...	...	...	...		
11/3/1997	-2559	511				13/4/1996	22,5	26,0	31,4						
15/4/1997	-2571	529				14/4/1996	22,0	26,0	31,4						
12/5/1997	-2565	515				15/4/1996	23,5	26,1	30,0						
...						

Figura 11 - Exemplo de agrupamento de dados para o cálculo de correlação atrasada Fonte: Buzzi (2007)

b) Correlação entre a leitura do instrumento e a ocorrência de precipitações acumuladas de dias passados:

Neste caso visa-se verificar a correlação entre a leitura do instrumento de interesse e a precipitação acumulada dos dias anteriores a essa leitura.

De acordo com Buzzi (2007) o procedimento para a elaboração desta verificação é similar ao aspecto anteriormente descrito, com a diferença de que na matriz de agrupamento, se colocará o valor acumulado dos dias anteriores à leitura para observar a correlação entre o evento pluviométrico e a resposta do instrumento (Figura 12).

JSF51 AB/F		Temp. Média		Matriz Agrupada	
...
5/2/1996	522	2/2/1996	26	5/2/1996	522 78
12/3/1996	505	3/2/1996	26	12/3/1996	505 80
16/4/1996	505	4/2/1996	27	16/4/1996	505 72
14/5/1996	530	5/2/1996	25	...	...
11/6/1996	545	6/2/1996	25		
9/7/1996	598	...	..
12/8/1996	615	9/3/1996	27		
10/9/1996	640	10/3/1996	27		
15/10/1996	591	11/3/1996	26		
12/11/1996	561	12/3/1996	27		
10/12/1996	550	13/3/1996	24		
18/2/1997	505	...	...
11/3/1997	511	13/4/1996	26		
15/4/1997	529	14/4/1996	26		
12/5/1997	515	15/4/1996	26		
16/6/1997	559	16/4/1996	20		
14/7/1997	558	17/4/1996	15		
...		

Figura 12 - Exemplo de agrupamento de dados para o cálculo de correlação atrasada acumulada Fonte: Buzzi (2007)

2.3.6 Análise multivariada

A análise multivariada corresponde um grande número de métodos e técnicas que utilizam, simultaneamente, todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos (NETO, 2004 apud VICINI, 2005).

Segundo INEA (2002), a análise multivariada é uma técnica matemática que permite o estudo simultâneo das relações entre mais de duas variáveis e unidades de análise num período de tempo determinado, gerando para cada variável uma média e uma variância, tendo como resultado a formação de uma matriz de covariância.

Para facilitar a interpretação posterior dos resultados deve ser feita a formulação de um modelo analítico, com as relações entre duas ou mais variáveis de maneira explícita e o estabelecimento de alguns requisitos prévios.

A técnica multivariada a ser utilizada determina-se a partir do conhecimento da maneira como se relacionam as variáveis inerentes ao fenômeno em estudo (INEA, 2002).

É recomendado por INEA (2002) iniciar a análise multivariada elaborando-se mapas conceituais e diagramas de processos.

Existem dois métodos na análise multivariada que se destacam quando o interesse é verificar como as amostras se relacionam ou quanto estas são semelhantes segundo as variáveis utilizadas. Estes métodos são: a análise de agrupamento hierárquico e a análise fatorial com análise de componentes principais (VICINI, 2005).

2.3.6.1 Análise de agrupamentos – AA

A análise de agrupamentos é uma técnica estatística que tem como objetivo encontrar e separar objetos (indivíduos ou elementos) em grupos similares através da aplicação de uma variedade de técnicas e algoritmos de acordo com uma medida de distância ou proximidade determinada.

Como a finalidade desta técnica é reunir os objetos (indivíduos ou elementos) em grupos, deve-se observar que estes apresentem homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre os diferentes grupos, objetivando propor classificações. Em outras palavras, os objetos em um grupo são relativamente semelhantes, em termos dessas variáveis, e diferentes de objetos de outros grupos.

A análise de agrupamentos, quando utilizada dessa forma, é o inverso da análise de fatores, pelo fato de reduzir o número de objetos, e não o número de variáveis, concentrando-os em uma quantidade muito menor de grupos.

Esta técnica estuda todo um conjunto de relações interdependentes, ou seja, não faz distinção entre variáveis dependentes e independentes (VICINI, 2005).

A análise de agrupamentos, segundo Vicini (2005), é um método simples, calcado nos cálculos de distância. No entanto, não requer conhecimento estatístico para a sua aplicação, como é o caso quando se aplica análise de variância, de regressão ou fatorial.

Villwock (2009) define este tipo de análise como o agrupamento de padrões feito com base numa medida de similaridade ou dissimilaridade.

Neste caso, para realizar a medida de similaridade se tem como premissa que quanto maior o valor da medida mais parecido são os objetos. Uma das maneiras mais conhecidas de realizar a medida de similaridade é o coeficiente de correlação.

Para avaliar se os objetos são dissimilares, utiliza-se a medida de dissimilaridade. Quanto maior o valor desta medida, menos parecidos serão os objetos. Para obter esta medida, é calculada a distância Euclidiana.

2.3.6.2 Análise fatorial - AF

Segundo Vicini (2005), quando se aplica a análise fatorial, o primeiro passo a ser realizado é a verificação das relações entre as variáveis, que pode ser feito utilizando-se o coeficiente de correlação linear como medida de associação entre cada par de variáveis.

Villwock (2009) define a análise fatorial como um método estatístico cujo objetivo é explicar as correlações entre um conjunto grande de variáveis em termos de um conjunto de poucas variáveis aleatórias não observáveis chamadas fatores.

A análise fatorial faz um agrupamento de variáveis para explicar a influência de variáveis latentes (não observáveis) ou fatores. Cada grupo representa um fator, pelo que dentro de um mesmo grupo, as variáveis são altamente correlacionadas entre si e de um grupo para outro as correlações são baixas. As correlações observadas são consequência deste agrupamento.

2.3.7 Análise de incerteza

A instrumentação é utilizada para realizar medições, e cada medição envolve erros e incertezas. Para poder compreender as incertezas, têm que ser definidos os significados dos termos ou elementos que estão associados às incertezas, com o fim de examinar os variados tipos de erros que podem afetar a medição e para sugerir como eles podem ser minimizados (DUNNICLIFF, 1988).

Segundo Christian e Baecher (1994), a incerteza na estabilidade de uma encosta é resultado de muitos fatores. Alguns, como a ignorância de detalhes geológicos perdidos nos programas de exploração, são difíceis de tratar formalmente. Outros, como as estimativas das propriedades do solo são mais propícios para a análise estatística.

As incertezas nas propriedades dos solos podem surgir de duas fontes: dispersão nos dados e erro sistemático na estimativa das propriedades. O primeiro consiste na variabilidade espacial inerente às propriedades e erros de testes aleatórios nas medições. O último consiste em erros estatísticos sistemáticos devido ao processo de amostragem e de polarização ou tendência no processo de medição.

Christian e Baecher (1994) aplicaram estes conceitos para o estudo da resistência ao cisalhamento do solo e de acordo com suas considerações foram observados quatro problemas:

1. Dispersão nos dados devido à variabilidade espacial de verdade dentro do perfil.
2. Dispersão nos dados devido a erros de testes aleatórios ou ruídos.
3. O erro sistemático do valor médio calculado da propriedade, devido ao número limitado de testes realizados, que conduz a uma incerteza estatística.
4. O erro na média devido a imprecisões na medição.

A Figura 13 apresenta o diagrama de incertezas proposto por estes autores.

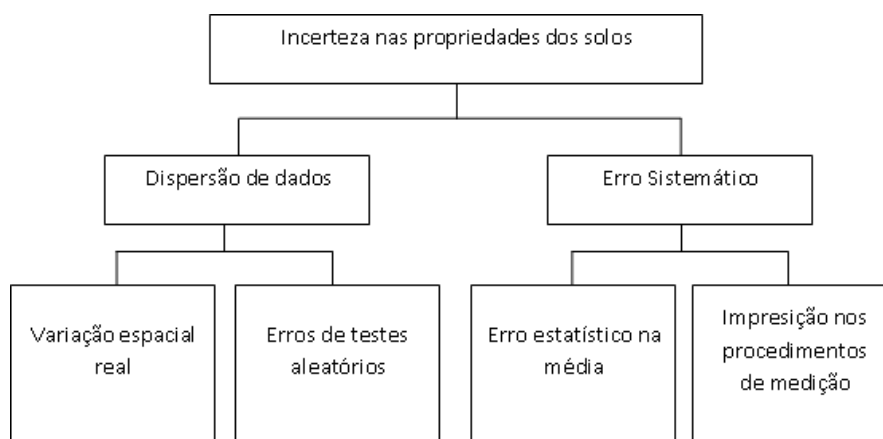


Figura 13 - Diagrama de incertezas na propriedade do solo proposto por Christian & Baecher.
Fonte: Christian & Baecher (1994)

De acordo com Hidalgo e Assis (2011), nas aplicações geotécnicas, a incerteza resultante da carência de dados, a ausência de informação sobre eventos ou processos, ou a falta de compreensão das leis físicas que limitam a habilidade para modelar o mundo real é chamada de incerteza epistêmica, subjetiva ou interna. Pode ser dividida em três subcategorias: incerteza na caracterização do local, incerteza nos modelos e incerteza nos parâmetros.

A incerteza na caracterização do local dependerá da adequada interpretação realizada quanto à geologia subsuperficial. Resulta da incerteza dos dados e da exploração incluindo erros na medição, inconsistência e heterogeneidade dos dados, erros de transcrição e inadequada representatividade do modelo devido a limitações de espaço e tempo, além das limitações econômicas.

A incerteza nos modelos depende do nível de precisão com que o modelo matemático escolhido representa a realidade. Esta incerteza reflete a incapacidade de um modelo ou técnica de representar o verdadeiro comportamento físico do sistema ou a dificuldade do que procede à análise em identificar o melhor modelo.

A incerteza nos parâmetros vai depender da precisão (acurácia) com que os parâmetros do modelo podem ser estimados. É resultado da inexatidão na determinação dos valores dos parâmetros a partir de ensaios ou calibração de dados, e pode se amplificar pelo número limitado de observações, resultando em imprecisão estatística.

3. Estudo de Caso km 140+700 m Pista Sul BR 101

No presente capítulo se apresentam as características geológico-geotécnicas do local de estudo, assim como o sistema de instrumentação e o sistema de contenção instalados.

3.1 Localização

A encosta objeto de estudo nesta dissertação encontra-se localizada na pista Sul da BR 101, entre os km 140+700 m e 140+950 m, entre as coordenadas S 27°01'30" e S 27°02'30" e W 48°35'30" e W 48°36'30" (Figura 14), entre os municípios de Balneário Camboriu e Itapema, no estado de Santa Catarina, correspondendo à feição geomorfológica do Morro do Boi. (SESTREM, 2012).



Figura 14 - Localização da área de estudo. Fonte: GoogleTM earth.

3.2 Histórico

De acordo com Sestrem (2012) a encosta em estudo apresenta um histórico de instabilidade caracterizado pela ocorrência de processos de movimentação que

tiveram como consequência o acúmulo de detritos sobre a rodovia e a interrupção do tráfego. As ocorrências de movimentos de massa registradas mais recentemente foram entre os dias 20 e 24 de novembro do ano de 2008, com rupturas decorrentes das intensas precipitações pluviométricas acontecidas no estado de Santa Catarina nesse período.

3.3. Aspectos Geológicos

Neste item serão descritos os aspectos geológicos correspondentes ao local de estudo para gerar as bases conceituais e conhecer o tipo de material a ser encontrado no local, com o fim de caracterizar as condicionantes naturais presentes.

3.3.3 Caracterização da Geologia Local

A área de estudo, localizada nas cercanias do Morro do Boi, caracteriza-se pela presença de dois tipos litológicos principais: Migmatitos Morro do Boi e granitos da Suíte Intrusiva Nova Trento. Esta suíte intrusiva é representada por um corpo intrusivo no Migmatito Morro do Boi, alinhado na direção NE–SW (FIORI, 2011).

O corpo de Migmatito do Morro do Boi estende-se por uma faixa de direção nordeste – sudoeste, variando de 1 a 1,5 km de largura e situa-se ao sul e ao leste da cidade de Camboriu (Figura 15). Apresenta um predomínio de estrutura estromática, frequentemente dobrada, onde são comuns xenólitos de rochas metabásicas, cinza escuro, variando desde homogêneos de aspecto maciço a finamente bandados, com aspecto gnáissico (FIORI, 2011).

O sistema de fraturas que apresenta o corpo de Migmatito do Morro do Boi é gerado por zonas de cisalhamento de direção NE-SW e NW-SE e por fraturas sub-horizontais. Isto tem como efeito principal a subdivisão do maciço em blocos o qual diminui de maneira importante sua resistência mecânica e, devido à continuidade e interconexão destas fraturas, facilitam o fluxo de água pelo interior do maciço.

A Suíte Intrusiva Nova Trento, apresenta um alinhamento nordeste-sudoeste, similar ao corpo de Migmatito intrudido, com uma largura de cerca de 500

metros. É caracterizada por biotita monzogranitos a quartzo-sienitos de coloração cinza clara, estrutura maciça e granulação média com cristais maiores de feldspato alcalino branco (FIORI, 2011).

A zona de cisalhamento ou sistema de fraturas presente na Suíte Intrusiva Nova Trento é similar ao sistema do Migmatito do Morro do Boi na direção NE-SW e no fraturamento sub-horizontal. Pelo que se pode inferir que os esforços que geraram estes sistemas ocorreram após a intrusão.

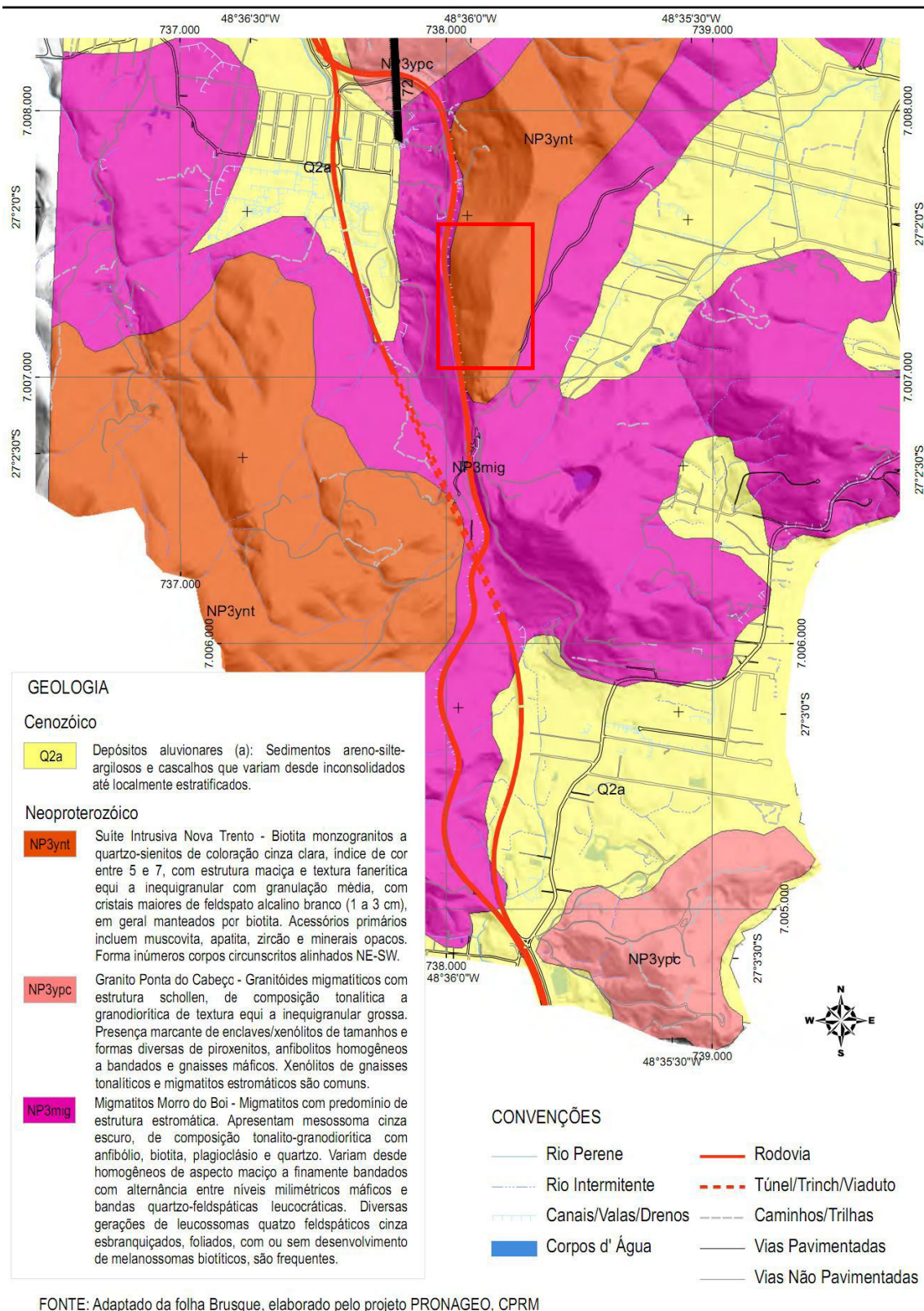


Figura 15 - Mapa geológico da região de estudo onde é sinalada a área de estudo no quadrado vermelho Fonte: Adaptado de Sestrem (2012)

Basei et al. (2011) realizaram uma descrição das principais características das rochas que se encontram associadas à Suíte intrusiva Nova Trento e o corpo migmatítico do Morro do Boi. Esta descrição pode ser observada na Tabela 2, onde são descritas as características macroscópicas, minerais principais, minerais acessórios e a composição de amostras destes tipos litológicos.

Tabela 2 - Características descritas por Basei et al. das rochas na área de estudo Fonte: Basei et al. (2011)

Corpos e Suítes	<i>Nova Trento Suíte</i> : Serra dos Macacos, Rio do Braço, Morro do Boi, Rio do Areial, Caêtes, Campo Novo Segundo, Indaiá, Rio do alho, Santo Antônio, Morro Pelado, Santo Aleixo, Beija Flor, Morro Redondo, Fatura, Rio do Salto, Nova Itália, Faxinal e Gaspar.
Características Macroscópicas	Equi a inequigranular, granitos leucocráticos cinza claros, algumas vezes porfiríticos.
Minerais Principais	Microclino, quartzo, oligoclasa, moscovita, biotita marrom e turmalina (traça).
Minerais Acessórios	Apatito, Zircón, Opacos.
Minerais Magmáticos tardios ou hidrotermais	Sericita, minerais de argila, epidoto/clinozoisite, fluorita.
Enclaves	Alguns enclaves microgranulares arredondados, raros xenólitos Valsungana.
Composição	Predominam os sienogranito e monzogranito, variando a quartzo-sienitos (Faxinal) e monzonitos (Gaspar), raramente granitos alcalinos-feldespáticos.

No mesmo trabalho, Basei et al. (2011) apresentam o resultado de um estudo litogeoquímico realizado pelo Actlabs, Canada, no qual se observam as porcentagens de compostos presentes em amostras de rochas da Suíte intrusiva Nova Trento e dos migmatitos do Morro do Boi. O estudo foi baseado em Fluorescência de raios X (XRF), ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma -Atomic Emission Spectrometry*) e REE por INAA (*Rare Earth Elements by Instrumental Neutron Activation*). Os resultados destes estudos estão descritos na Tabela 3, podendo ser observado o alto conteúdo de SiO_2 presente nas amostras e o baixo conteúdo de Al_2O_3 . É dada ênfase nestes dois compostos já que estes caracterizam a composição da rocha. Rochas com grande quantidade de SiO_3 geram solos residuais com granulometria predominantemente arenosa, devido à grande presença de quartzito.

Tabela 3 - Composição litogeoquímica de amostras de rochas pertencentes para os granitoides intrusivos do domínio do Grupo Brusque (Suíte intrusiva Nova Trento e Morro do Boi) através de elementos majoritários e traças mediante XRF, ICP-AES, e REE pelo INAA. Fonte: Basei et al. (2011)

	Nova Trento NC7A (%)	Morro do Boi M.Boi 2 (%)
SiO_2	76,55	74,29
Al_2O_3	12,74	13,76
Fe_2O_3	1,52	1,66
CaO	0,90	1,41
MgO	0,15	0,40
Na_2O	3,7	3,38
K_2O	4,47	4,73
MnO	0,05	0,04
TiO_2	0,12	0,18
P_2O_5	0,04	0,07
S		
$\text{H}_2\text{O} +$	0,59	0,49
TOTAL	100,83	100,41

3.4 Aspectos Geofísicos

Segundo Braga (2007) os métodos geofísicos de prospecção podem ser definidos como métodos indiretos de sondagem que têm como finalidade gerar conhecimento sobre as principais características geológicas presentes no subsolo e servem como ajuda para a caracterização geotécnica do local de estudo.

Através dos métodos geofísicos podem ser estudadas grandes áreas de maneira rápida e com custos relativamente baixos.

Estes diferentes métodos, que inicialmente foram aplicados na área de prospecção de petróleo para diferenciar estratos, estruturas e litologia, hoje têm sido aplicados em outras áreas de interesse, como a geotecnia.

3.4.1 Caracterização geofísica

Para realizar a caracterização geofísica do local de estudo foi utilizado o método da eletrorresistividade. Este tipo de sondagem permitiu conhecer aspectos tais como: espessura de cobertura do solo, presença de blocos/matacões, profundidade do maciço e fraturas ao longo dos perfis.

Estudos realizados na encosta definiram um perfil de resistividade primário, que vai ser tomado como referência para dar uma complementação na discussão do comportamento do solo baseado nas características da encosta.

Na realização deste trabalho se utilizaram duas técnicas básicas de aplicação do método de eletrorresistividade: o caminhamento elétrico (CE) e a sondagem elétrica vertical (SEV).

Entre os resultados preliminares obtidos pelo estudo da eletrorresistividade, pode ser observada na Figura 16, correspondente ao caminhamento 01, uma espessura de solo residual de aproximadamente 4 m que diminui no pé da encosta, e espessuras constantes de rocha alterada ao longo do perfil.

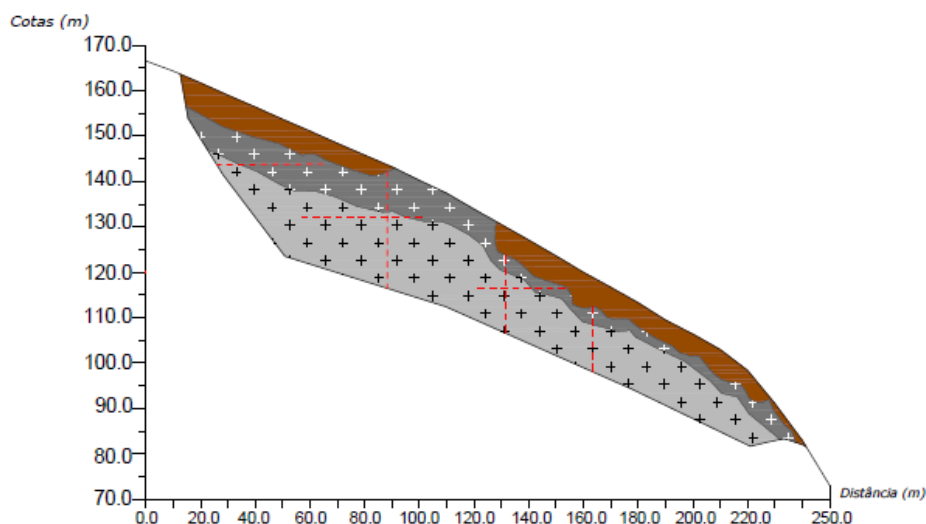


Figura 16 - Interpretação geológica do CE 01. Fonte: Tecgeofísica (2012)

No caminhamento 02, observam-se espessuras de solo maiores, com uma zona pouco resistiva e com fragmentos de material resistivo (matações) no interior e espessuras maiores de rocha alterada (Figura 17).

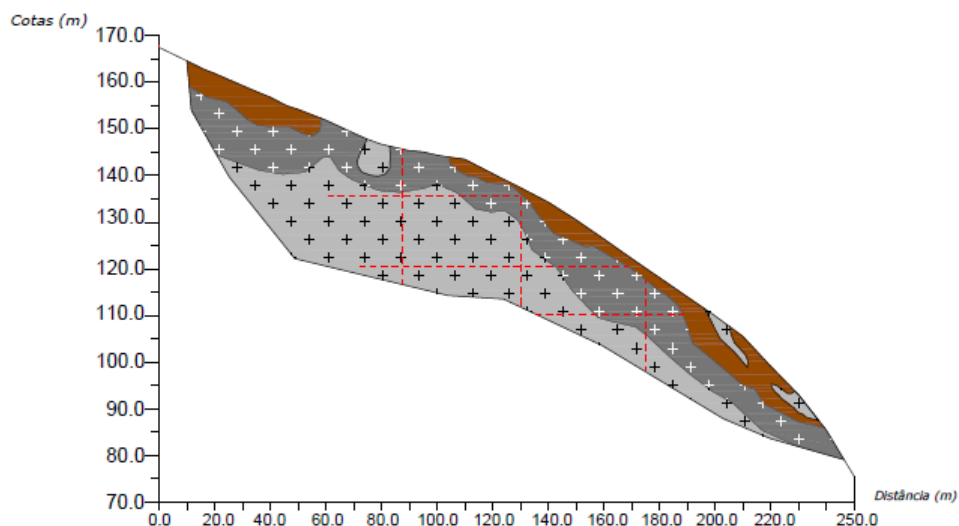


Figura 17 - Interpretação geológica do CE 02. Fonte: Tecgeofísica (2012)

O caminhamento 03 apresenta uma área com pouca resistividade na parte inferior da encosta, que descreve o perfil onde estão colocados parte dos instrumentos. Este caminhamento está localizado sobre uma sondagem mista e através da descrição da mesma foi confirmado o resultado apresentado pela

interpretação da eletrorresistividade (Figura 18). Pode observar-se uma camada de solo de pouca espessura com presença de matações sobre a rocha alterada.

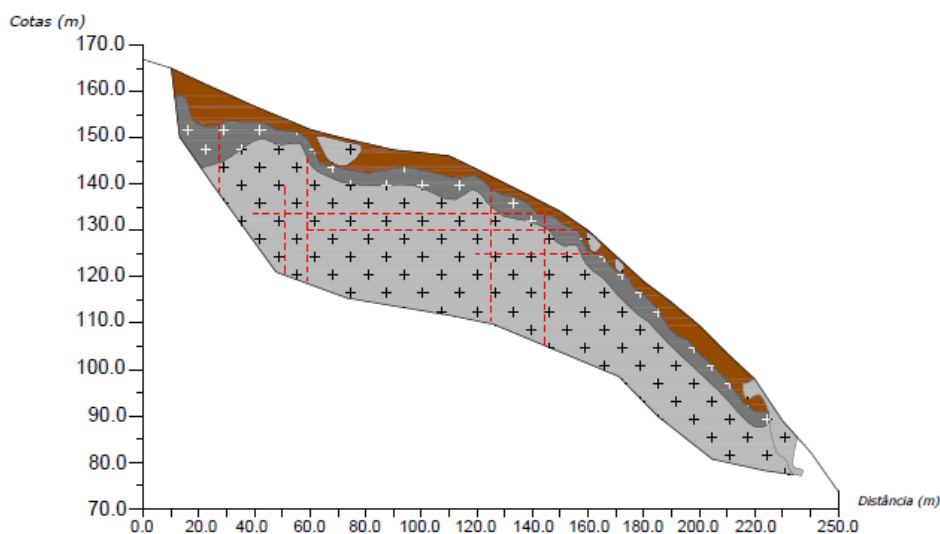


Figura 18 - Interpretação geológica do CE 03. Fonte: Tecgeofísica (2012)

Na Figura 19 mostra-se o caminhamento 04 o qual apresenta também uma área de baixa resistividade na parte inferior da encosta aproximadamente na área instrumentada. As espessuras de solo mantêm-se constantes, não chegando até o pé da encosta.

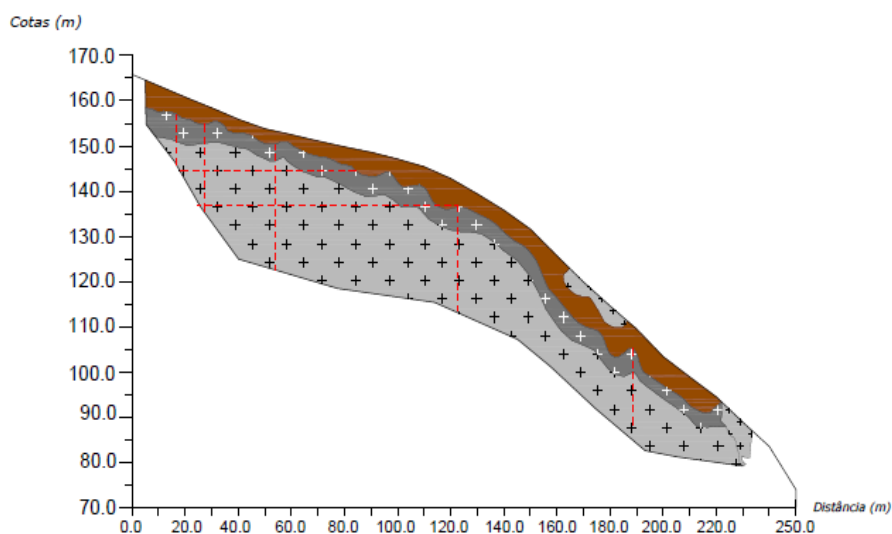


Figura 19 - Interpretação geológica do CE 04. Fonte: Tecgeofísica (2012)

O caminhamento 05, localizado ao sul, apresenta maiores espessuras de solo, podendo-se inferir que a área já teve movimento de massas devido ao formato da camada, a presença de blocos de grande dimensão e a forma da rocha subjacente (Figura 20)

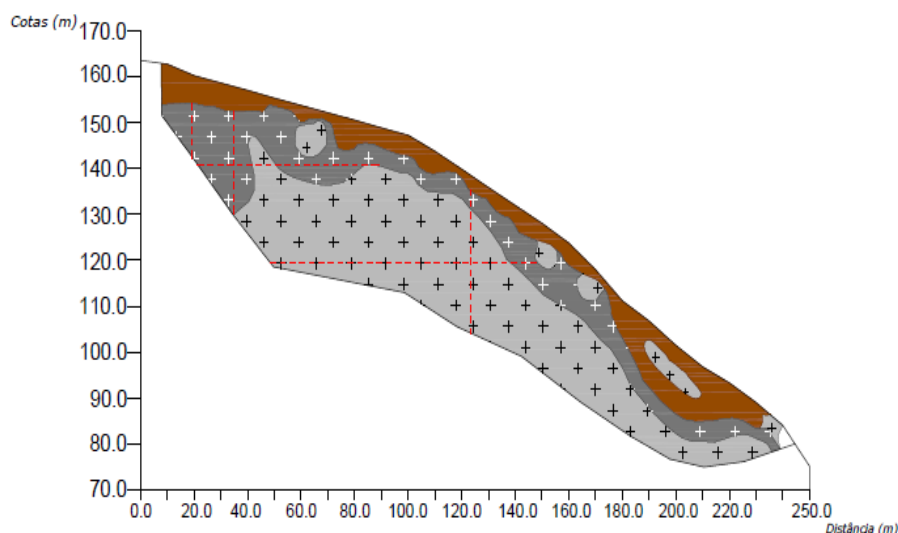


Figura 20 - Interpretação geológica do CE 05. Fonte: Tecgeofísica (2012)

A Figura 21 corresponde ao caminhamento 06 disposto transversalmente à encosta. Este caminhamento foi realizado sobre a ilha intermediária da instrumentação. Nesta figura apresenta-se a interpretação geológica para os diferentes níveis de resistividade obtidos no imageamento (Figura 115).

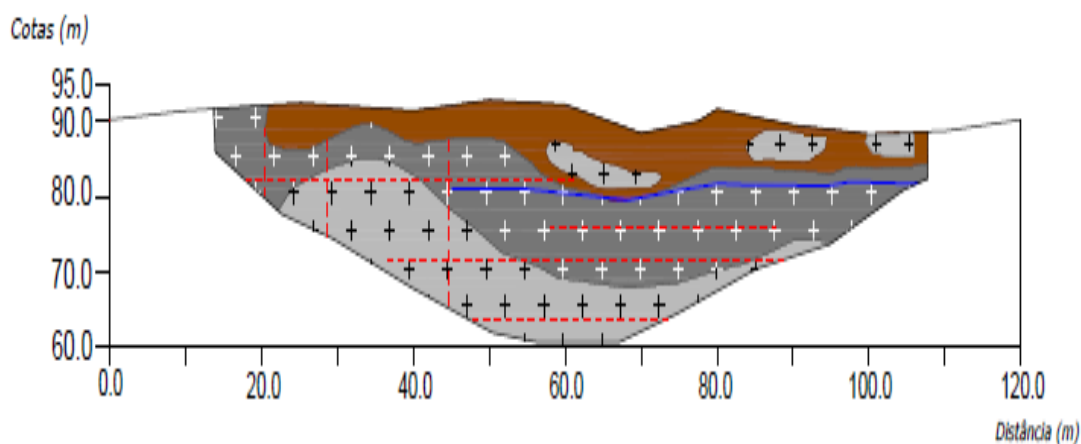


Figura 21 - Interpretação geológica do CE 06. Fonte: Tecgeofísica (2012)

Com respeito à seção elétrica vertical realizada neste trecho, a interpretação geológica apresentada na Figura 22 mostra espessuras de solo residual de aproximadamente 3,3 metros, e 2,7 metros de rocha alterada, para encontrar o contato rocha alterada-rocha sã a uma profundidade de aproximadamente 7,0 metros, em concordância com as informações obtidas através das sondagens SPT e rotativa disponíveis.

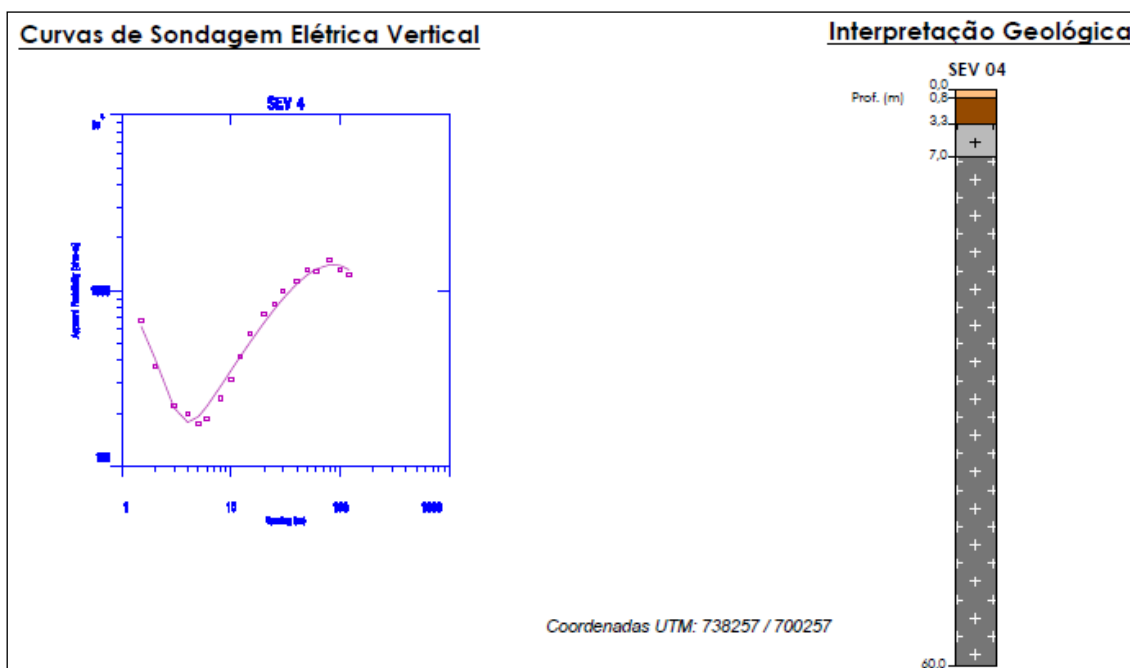


Figura 22 - Interpretação da sondagem elétrica vertical SEV 04. Fonte: Tecgeo (2012)

Os imageamentos elétricos base para a realização da interpretação geológica dos perfis apresentados nas figuras anteriores encontram-se nos anexos, nas Figuras 110 a 115, junto com a localização em planta dos caminhamentos (Figura 116).

3.5 Caracterização geotécnica

Para uma maior compreensão das propriedades do solo encontrado no local e das suas características físicas e mecânicas, foram conduzidas sondagens e diferentes ensaios os quais serviram para definir estas propriedades na área de estudo.

As sondagens foram conduzidas no estudo preliminar do projeto sendo estas do tipo percussão e mistas além de ensaios penetrométricos leves (tipo DPL). De acordo com Kormann et al (2011) no km 140+700m foram realizadas três sondagens

a percussão denominadas SP-01, e seus deslocamentos SP-01A e SP-01B, os quais permitiram identificar uma camada de solo residual de migmatito com espessura da ordem de 3,0 m descrita como silto-areno-argilosa e com índices NSPT variando entre 16 e 27 golpes. Para obter informação do solo abaixo dos 3 m de profundidade foram realizadas cinco sondagens mistas com equipamento rotativo denominadas SM-01, SM-02, SM-03, SM-04 e SM-05. Nestas sondagens se identificou uma espessura média de 6,0 m de solo à montante da ruptura (SM-02, SM-03, e SM-04) e de 3,0 m no local da ruptura (SM-01 e SM-05) sendo encontrado o nível de água em todas as sondagens com variação entre 3,5 m e 7,5 m de profundidade. A partir das informações obtidas nestas sondagens foi possível realizar uma interpretação do subsolo da encosta interpolando as informações (Figura 23).

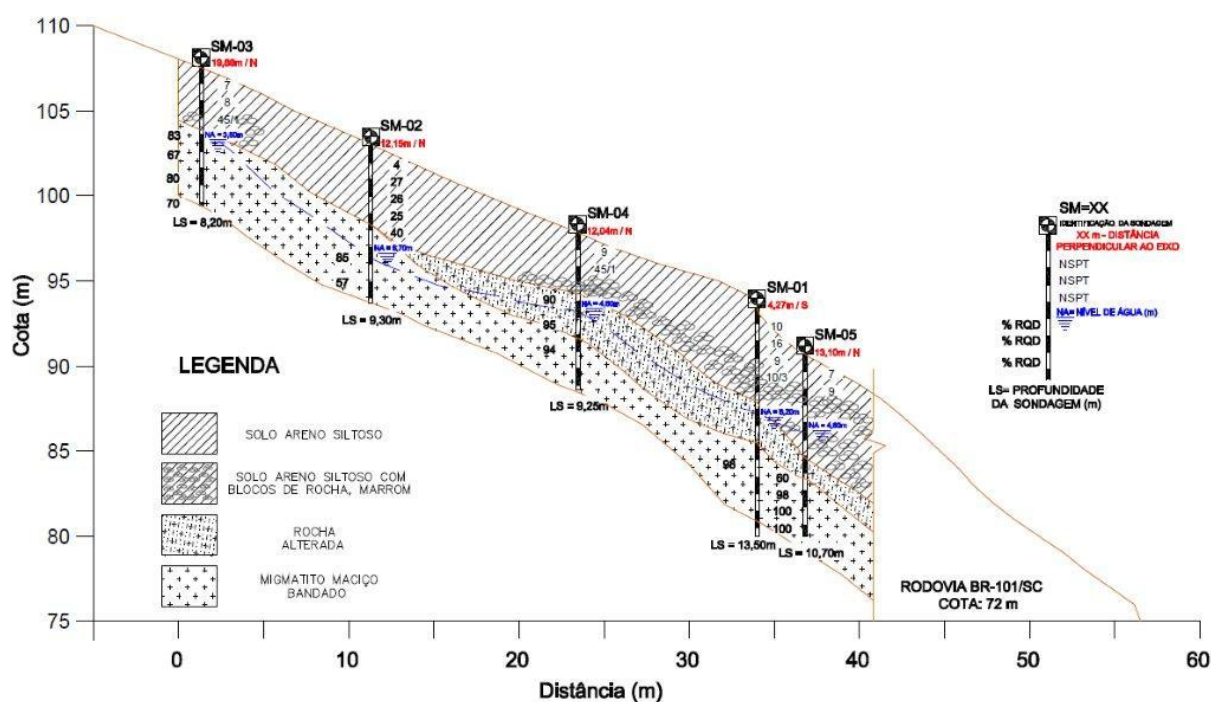


Figura 23 - Perfil geológico-geotécnico interpretado a partir das informações das sondagens no Km 140+700m e as seções geofísicas. Modificado de Kormann *et al* (2011).

Quanto aos ensaios de laboratório, estes foram realizados durante o desenvolvimento desta pesquisa, no intuito de complementar as informações necessárias para a determinação das propriedades índices dos solos, usando as normas e procedimentos ditados pela ABNT. Entre estes ensaios estão incluídos os

ensaios de caracterização (análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos grãos, umidade natural) e cisalhamento direto.

Para a realização dos ensaios de laboratório, foram coletadas 33 amostras de solo deformadas e 4 indeformadas em blocos que serviram para realizar os ensaios de cisalhamento direto. Destas 33 amostras, 15 coletadas na área monitorada, pertencente ao km. 140+700m e 14 foram coletadas no km. 140+950m. As quatro amostras indeformadas foram coletadas no km. 140+700m.

Os ensaios de caracterização antes mencionados permitiram classificar o solo como areno-siltoso (SM), com valores de limite de liquidez entre 16 e 48 %, limite de plasticidade entre 15 e 34 %, densidade real dos grãos com média de 2,671 g/cm³, teor de umidade natural entre 12 e 28% e apresentando ângulo de atrito entre 26 e 40°. Os resultados dos ensaios mencionados apresentam-se na Tabela 4 como a média dos valores obtidos.

Tabela 4 - Tabela de caracterização geotécnica correspondente aos ensaios realizados nas amostras do km 140+700 m e km 140+950 m na pista Sul da BR 101-SC.

Classificação (ABNT-NBR 6457)	<i>LL (%)</i>	<i>LP (%)</i>	γ (g/cm ³)	<i>w (%)</i>	ϕ
SM	28	22	2,671	20	31°

3.6 Projeto de estabilização

O projeto de estabilização da encosta em estudo contemplou a utilização de uma solução que não tem histórico de aplicação prévia para contenção de massas coluvionares e/ou talus através do uso combinado de ancoragens passivas e uma tela de proteção (SESTREM, 2012).

Esta solução de estabilização consiste em ancoragens passivas distanciadas 1,80 m entre elas e chumbadas no talude com comprimentos de seis metros ou embutidas um metro na rocha sã. Conjuntamente com os grampos, foi colocada uma malha de aço altamente resistente com 3 mm de diâmetro, denominada TECCO® (Geobrugg, 2013) acompanhando o relevo da encosta.

Para evitar o deslocamento de pequenos fragmentos de rocha através da malha, foi colocado um geotêxtil não tecido drenante.

Este sistema foi fixado por meio de placas do sistema TECCO®. Estas placas são feitas de aço leve e reforçadas com ranhuras, tendo uma concepção para pré-tensionamentos do sistema de 30 a 50 kN (Geobrugg, 2013). Estas placas são colocadas na cabeça do grampo e têm como objetivo principal evitar o efeito de puncionamento provocado pela concentração de esforços (Figura 24). Devido à malha vir em rolos de 35 m de comprimento e 3,5 m de largura, tiveram que ser usadas garras de fixação para uni-las.



Figura 24 - Imagens das placas de fixação utilizadas no sistema (esquerda) e das garras de fixação que unem os rolos sobrepostos de malha ao longo do sistema (direita) Fonte: Geobrugg (2013)

O sistema como um todo consiste na distribuição das cargas exercidas pela massa instabilizada. Isto implica em que o controle das deformações se dá através da flexibilidade da malha e da capacidade de redistribuição dos esforços nos grampos chumbados no maciço rochoso (Figura 25).

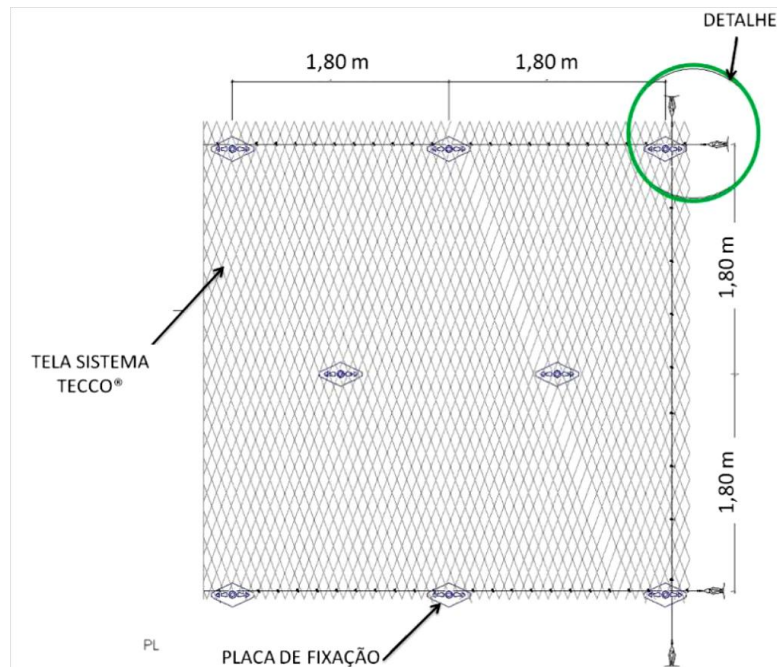


Figura 25 - Diagrama do sistema de estabilização TECCO® Fonte: Sestrem (2012)

3.7 Plano de instrumentação

O plano de instrumentação desenvolvido por Sestrem (2012) consiste no monitoramento de aspectos geológico-geotécnicos, hidrológicos e ambientais através de medições que identificam as variações de parâmetros tais como poro pressões, sucção no solo, deslocamentos de massas de solo, deformações do sistema de estabilização e eventos pluviométricos.

A Figura 26 representa de maneira gráfica os aspectos a serem monitorados e os instrumentos correspondentes para tal fim.

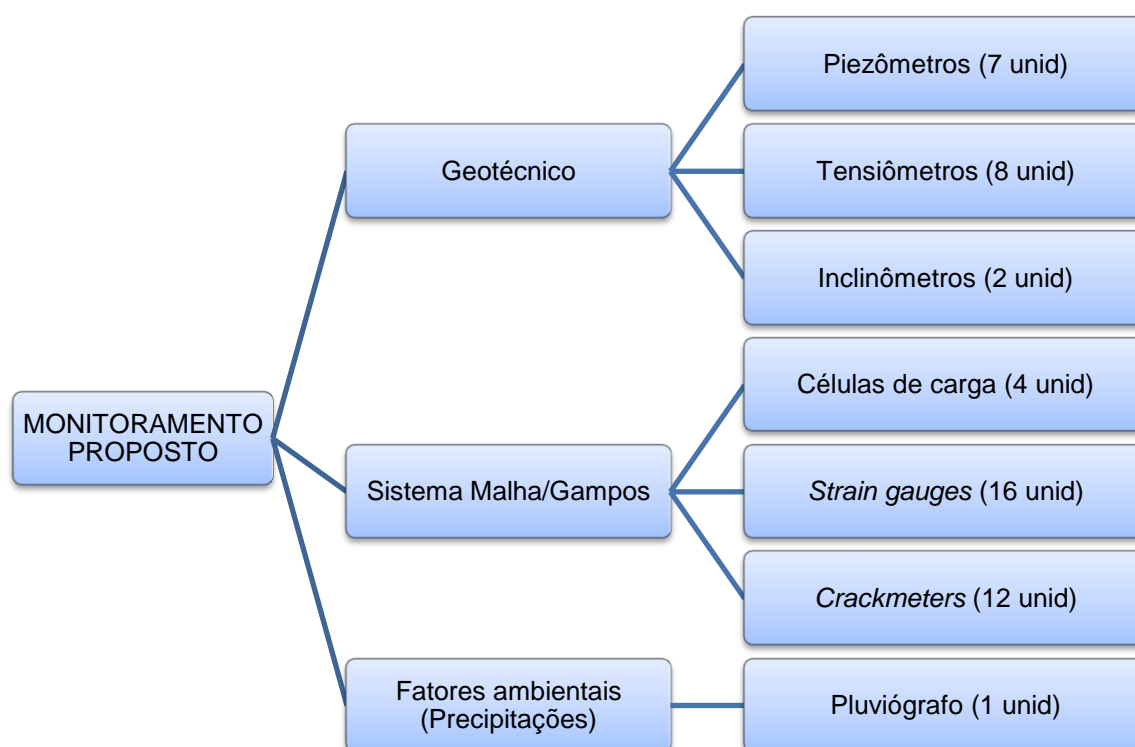


Figura 26 - Diagrama de monitoramento proposto por Sestrem (2012) para o monitoramento da encosta. Fonte: Adaptado de Sestrem (2012)

A distribuição dos instrumentos colocados no sistema de contenção pode ser observada na Figura 27, a qual traz um croqui que dá uma noção espacial da localização das denominadas ilhas de instrumentação.

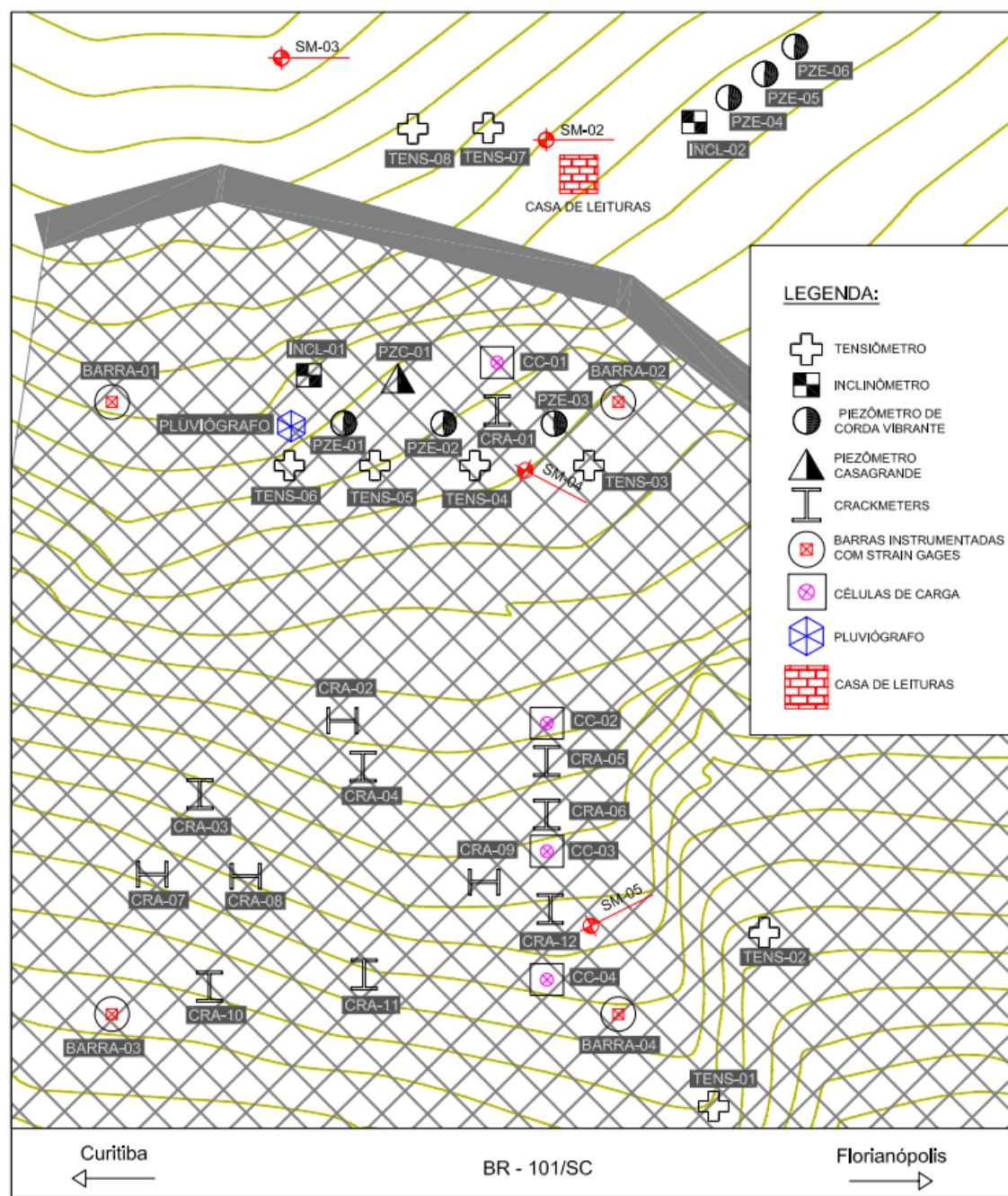


Figura 27 - Croqui de instalação dos instrumentos em planta Fonte: Sestrem (2012)

3.7.1 Instrumentos

Os instrumentos analisados estão descritos na Tabela 5. Estes instrumentos encontram-se localizados no que Sestrem (2012) denomina como “ilhas”, que definem grupos de instrumentos agrupados e localizados em certos níveis da encosta.

Tabela 5 - Instrumentos colocados para o monitoramento da encosta no km 140+700 m.

Instrumento	Quantidade	Nomenclatura	Quant. de leituras/Inst.
Piezômetros de corda vibrante	6	PZE	2552
Piezômetro Casagrande	1	PZC	-
Tensiômetros elétricos	8	TENS	2552
Inclinômetros	2	INCL	13
Strain-gauges	16	SG	2552
Crack-meters	12	CRA	2552
Células de carga	4	CC	2552
Pluviógrafo	1	PLUV	7143

3.7.1.1 Piezômetros

Os piezômetros instalados no local correspondem a instrumentos de corda vibrante. As suas características são descritas na Tabela 6. Estes instrumentos encontram-se distribuídos em duas ilhas de três instrumentos cada uma, localizadas na parte superior do sistema de estabilização e outra no médio. As profundidades e diagramas de instalação dos piezômetros podem ser encontrados na Tabela 7 e Figura 28 respectivamente.

Tabela 6 - Descrição das características dos piezômetros de corda vibrante Fonte: Adaptado de Sestrem (2012)

Instrumento	Piezômetro de corda vibrante
Fabricante	Geokon
Modelo	4500S
Quantidade	6
Propriedade medida	Poros pressões

Capacidade	-100 kPa a 350 kPa
Precisão	0,35 kPa (0,1% F.S.)
Resolução	0,0875 kPa (0,025% F.S.)

Tabela 7 - Profundidade de instalação dos piezômetros. Fonte: Adaptado de Sestrem (2012)

Ilha	Instrumento	Profundidade (m)
Intermediária 1	Piezômetro 1	8,65
	Piezômetro 2	6,40
	Piezômetro 3	3,90
Superior 2	Piezômetro 4	8,60
	Piezômetro 5	7,20
	Piezômetro 6	3,70

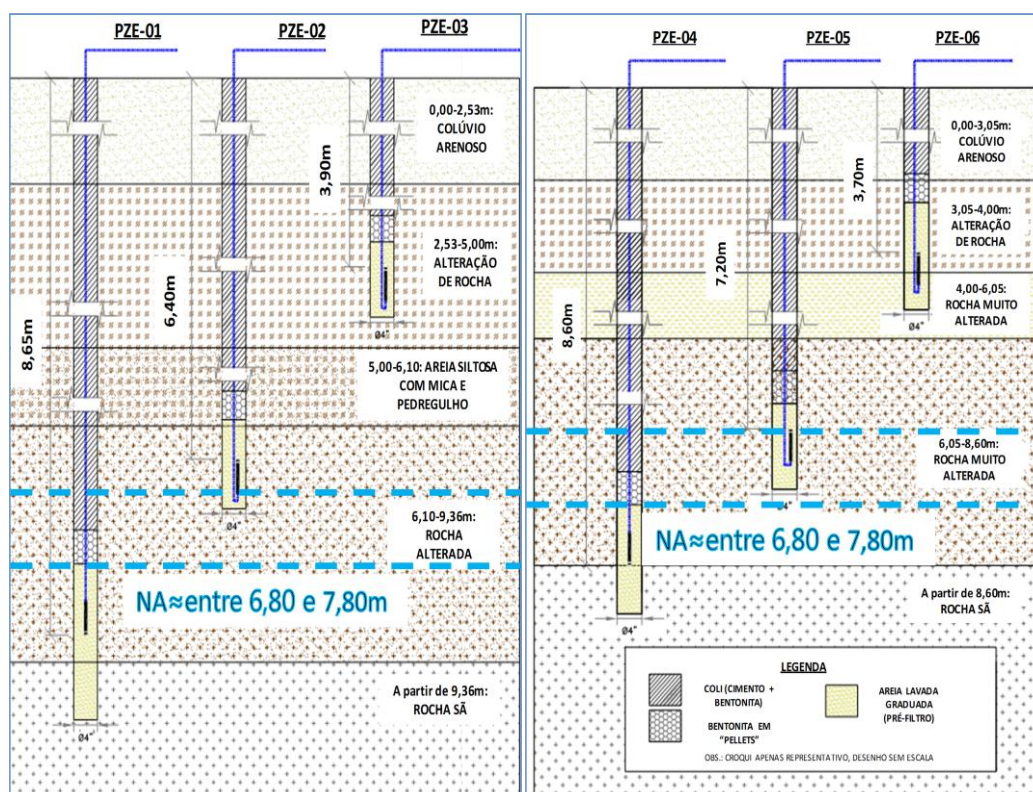


Figura 28 - Diagrama de colocação dos piezômetros. Fonte: Sestrem (2012)

3.7.1.2 Tensiômetros

Os tensiômetros utilizados na instrumentação correspondem a instrumentos de resistência elétrica. As características principais encontram-se descritas na Tabela 8. Estes instrumentos estão localizados em três ilhas, posicionadas na parte

superior, no centro e na parte inferior do sistema de contenção a diferentes profundidades (Tabela 9).

Tabela 8 - Descrição das características dos tensiômetros elétricos. Fonte: Adaptado de Sestrem (2012).

Instrumento	Tensiômetro
Fabricante	Soil Moisture
Modelo	2725A
	S301 Transducer
Quantidade	8
Propriedade medida	Sucção
Capacidade	0 - 100 kPa
	80-85 kPa (limite prático)
Frequência de Leitura	0 - 20 mA

Tabela 9 - Profundidade de instalação dos tensiômetros elétricos. Fonte: Adaptado de Sestrem (2012)

Ilha	Instrumento	Profundidade (m)
Inferior 1	Tensiômetro 1	1,00
	Tensiômetro 2	2,00
Intermediária 2	Tensiômetro 3	0,50
	Tensiômetro 4	2,55
	Tensiômetro 5	1,00
	Tensiômetro 6	2,00
Superior 3	Tensiômetro 7	1,00
	Tensiômetro 8	2,00

3.7.1.3 Inclínômetros

Para o monitoramento dos deslocamentos horizontais, foram colocados dois tubos ou “casing” para o uso do inclinômetro tipo sonda (torpedo) na parte superior e no centro do sistema de contenção, estando os dois perto das ilhas de instrumentos (piezômetros e tensiômetros), no intuito de relacionar os possíveis deslocamentos com fatores como o aumento ou a diminuição da poro pressão e sucção. As características destes tubos encontram-se descritas na Tabela 10 juntamente com a profundidade de instalação.

Tabela 10 - Características dos tubos para os inclinômetros e profundidade de instalação.
Fonte: Adaptado de Sestrem (2012)

Instrumento	Inclinômetro (Case)
Fabricante	-
Modelo	Convencional (Com guias de eixos)
Quantidade	2
Propriedade medida	Deslocamentos Horizontais
Profundidade de instalação	13 m

3.7.1.4 *Strain gauges*

Para realizar o monitoramento dos esforços presentes nos grampos, foram instrumentadas quatro barras com *strain gauges* do tipo corda vibrante (Tabela 11). Esta instrumentação consistiu na colocação de quatro sensores por barra monitorada, posicionados um na parte do grampo que fica embutido na rocha sã (2,50 m), dois na parte central do grampo colocados diametralmente opostos (4,00 m) e um na parte mais superficial do grampo (5,50 m). A distribuição dos *strain gauges* esta descrita na Tabela 12.

Tabela 11 - Descrição das características dos strain gauges

Instrumento	<i>Strain gauges</i>
Fabricante	Geokon
Modelo	4150
Quantidade	16
Propriedade medida	Deformações
Capacidade	2500 $\mu\epsilon$
Frequências de leituras	1400 - 3500 Hz
Precisão	2 mm (2% F.S.)

Tabela 12 - Distribuição dos strain gauges e profundidade de instalação em cada barra instrumentada

Barra	Profundidade de instalação		
	(2,50 m)	(4,00 m)	(5,50 m)
Barra 1	SG-08	SG-06 / SG-07	SG-05
Barra 2	SG-12	SG-10 / SG-11	SG-09
Barra 3	SG-16	SG-14 / SG-15	SG-13
Barra 4	SG-04	SG-02 / SG-03	SG-01

3.7.1.5 Células de carga

As células de carga instaladas são do tipo corda vibrante. Encontram-se distribuídas em quatro pontos do sistema, entre a placa de fixação da malha e a cabeça dos grampos, para monitorar as cargas geradas pelas possíveis tensões de compressão por deslocamento de massa. Um resumo das características destes instrumentos se encontram na Tabela 13.

Tabela 13 - Descrição das características das células de carga

Instrumento	Células de carga
Fabricante	Geokon
Modelo	4900
Quantidade	4
Propriedade medida	Força
Capacidade	100 kip (50 tf)
Frequência de vibração	1400 - 3500 Hz
Precisão	0,5 tf (1% F.S.)
Resolução	0,01 tf (0,02%)

3.7.1.6 Crackmeters

Os *crackmeters* ou alongômetros foram posicionados para realizar o monitoramento das deformações da malha metálica de contenção, podendo identificar os deslocamentos de massa que possam ser gerados no decorrer do monitoramento. Estes instrumentos foram colocados em quatro ilhas. A primeira ilha contém um *crackmeter*, quatro *crackmeters* na ilha 2, três *crackmeters* na ilha 3 e quatro *crackmeters* na ilha 4. A colocação dos sensores foi concebida em posições

ortogonais, com o objetivo de monitorar as solicitações em duas direções. As principais características destes instrumentos encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Descrição das características dos crackmeters.

Instrumento	<i>Crackmeters</i>
Fabricante	Geokon
Modelo	4420
Quantidade	12
Propriedade medida	Deslocamentos
Capacidade	100 mm / 4"
Frequência de vibração	1200 - 2800 Hz
Resolução	0,025 mm (0,025% F.S.)

3.7.1.7 Pluviógrafo

O pluviógrafo colocado no local corresponde ao tipo de caçamba basculante, posicionado no centro do sistema de contenção, no patamar intermediário da instrumentação onde se encontram as ilhas de piezômetros e tensiômetros. Foi escolhida esta localização por apresentar as condições necessárias para que não houvesse influência da vegetação existente no topo da encosta. Encontra-se chumbado ao solo através de uma base de concreto e um grampo colocado verticalmente. O instrumento encontra-se a 1,0 m de altura, obedecendo às recomendações do fabricante. As características principais encontram-se resumidas na Tabela 15.

Tabela 15 - Descrição das características do pluviógrafo.

Instrumento	Pluviógrafo
Fabricante	Hidrological Services
Modelo	TB4/0.2
Quantidade	1
Propriedade medida	Precipitações pluviométricas
Capacidade	100.000 eventos
Resolução	1 segundo

3.7.1.8 Sistema de alimentação de energia

Para garantir o correto funcionamento do sistema quanto à energia necessária para a realização das leituras de modo automático, foi instalado no local um sistema de alimentação de energia composto por um painel solar que alimenta uma bateria automotiva de 65 ampers/hora (Ah). As características principais deste equipamento são descritas na Tabela 16.

Tabela 16 Descrição das características do sistema de alimentação de energia.

Instrumento	Painel Solar
Fabricante	Kyocera
Modelo	KD140SX-UPU
Quantidade	1
Voltagem máximo do sistema	600 V

O painel solar foi instalado na estrutura da casa de leituras a qual serve como apoio para a fixação deste. Está colocado com uma orientação paralela à encosta, de maneira a receber a maior parte da claridade do dia, garantindo que a carga da bateria seja otimizada.

3.7.1.9 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados foi definido com base na premissa da automação das leituras e em frequências de leituras representativas. (SESTREM, 2012).

Para isto foi instalado um *data logger* modelo MICRO-1000, marca Geokon, no qual se coletam e armazenam de maneira automática as leituras dos instrumentos compatíveis. Adicionalmente foram colocados quatro multiplexadores 16x4, modelo 8032-16-1S, com a finalidade de expandir o número de canais de leituras necessários para integrar todos os instrumentos.

4. Material e métodos

No presente capítulo será descrito o material e os métodos utilizados na pesquisa, constituídos em bases de dados das leituras dos instrumentos, as etapas dos métodos estatísticos utilizados para sua análise, e procedimentos de leitura.

4.1 Coleta de dados

A coleta (descarregamento) de dados foi realizada em intervalos mínimos de uma vez por mês no intuito de garantir o funcionamento dos instrumentos de medição, assim como do sistema de alimentação de energia, evitando-se possíveis perdas de dados, além de permitir o processamento destes e avaliar o comportamento do monitoramento.

Para a realização da coleta de dados foram marcadas visitas a campo para, com o uso de um computador portátil, realizar a descarga dos dados que são armazenados de maneira automática no *data logger*.

Esta descarga é feita através do software Multilogger da Geokon, onde as leituras armazenadas são descarregadas num arquivo “.dat” e transferidas para um arquivo de formato MS-Excel.

No caso do pluviógrafo, pelo fato deste ter um *data logger* próprio, as leituras foram obtidas de maneira independente das do restante da instrumentação. A coleta destes dados foi realizada em cada visita de campo.

Os procedimentos para a coleta dos dados encontram-se detalhados no apêndice desta dissertação.

4.2 Períodos analisados

Os períodos analisados no presente trabalho estiveram marcados pelo começo no dia 07 de maio do ano 2012 até o dia 06 de março do ano 2013, tendo uma pausa entre o dia 07 de novembro e 13 de dezembro devido a uma falha no *data logger* que não foi percebida pela equipe de monitoramento.

4.3 Frequência de leitura da instrumentação.

A frequência de leitura da instrumentação instalada na obra foi recomendada no plano de instrumentação (SESTREM, 2012), tendo como objetivo acompanhar as variações dos parâmetros de interesse e as condições nas quais estas acontecem.

Estas frequências recomendadas no plano de instrumentação devem ser realizadas ou tomadas como frequências mínimas de leitura, com a possibilidade de serem aumentadas ou ajustadas dependendo das mudanças nas condicionantes ambientais, como por exemplo, precipitações severas, ou pela alteração significativa de valores em instrumentos de medição de deslocamentos.

Os instrumentos automatizados como piezômetros, tensiômetros, células de carga, *strain gauges* e *crackmeters*, foram programados por meio do *data logger* para obter leituras em períodos de oito (08) horas de forma contínua nos primeiros seis (06) meses de leitura, desde o dia 07 de Maio de 2012 até o dia 07 de Novembro de 2012. A partir do dia 13 de Dezembro de 2012 foi programado o *data logger* para que as leituras se realizarem a cada hora. Os inclinômetros, que precisam ser monitorados manualmente, tem uma frequência de leitura de, no mínimo, uma vez por mês. Além destas frequências de leituras, tem-se monitorado manualmente os tensiômetros cada vez que são realizadas as visitas a campo, com frequência de uma vez por mês..

A frequência de leituras das precipitações não apresenta o mesmo padrão de programação que as outras leituras da instrumentação devido que o pluviógrafo registra os eventos na medida em que estes ocorrem.

As mudanças no padrão de monitoramento, como as experimentadas nesta dissertação, são amplamente utilizadas nos casos onde quer-se ressaltar eventos ou comportamentos específicos nas leituras dos sensores.

Como exemplo destas mudanças na programação de leituras sinala-se o trabalho de Rahardjo et al. (2007) os quais implementaram uma programação no *data logger* onde em períodos secos a frequência de leitura era realizada a cada quatro (04) horas e durante os períodos de precipitação em intervalos de dez (10) minutos, monitorando nesta frequência até três (03) horas depois de ter parado a

chuva com a finalidade de registrar com precisão as mudanças nas condições da encosta.

Esta programação foi possível devido a que o pluviógrafo foi sincronizado ao *data logger*, de maneira que quando este registrava o primeiro evento o sistema mudava de maneira automática os tempos de leitura.

4.4 Preparação dos dados

A preparação dos dados é feita segundo o plano de instrumentação (SESTREM, 2012), onde a partir das informações brutas das leituras feitas pelos instrumentos e coletadas pelo *data logger*, são processadas através de programas computacionais mediante a utilização das equações fornecidas pelos fabricantes dos sensores para obter valores em unidade de medida dependendo do instrumento e formada uma base de dados em ambiente MS-Excel®.

A preparação dos dados consiste em realizar uma revisão visual destes de maneira que possam ser detetadas possíveis leituras anômalas e determinar se estas são causadas pelos instrumentos ou pela influência de fatores externos, como por exemplo, as visitas a campo para realizar as leituras manuais e coleta de dados. Para isto são realizados os diagramas de frequência e verifica-se os horários nos quais a equipe de monitoramento esteve no local.

Entre os instrumentos que podem sofrer alterações diretas das leituras nas visitas de campo encontram-se os *crackmeters* e os tensiômetros.

Quanto aos *crackmeters* existe a possibilidade de serem alteradas as leituras devido a que para descer às ilhas intermediárias, onde se encontram parte dos instrumentos, deve-se caminhar pela malha metálica do sistema de contenção, podendo assim afetar as leituras pelo esticamento ou compressão destes na medida em que o pessoal se desloca pela encosta acima do sistema.

A ocorrência de alterações nas leituras dos tensiômetros podem ser afetadas devido ao fato que quando é realizada a leitura manual destes, na verificação de possíveis bolhas de ar no interior do tubo, tem que ser bombeada a água que se encontra no reservatório. Neste procedimento as leituras de sucção

caem para valores mínimos e a recuperação da leitura em muitos casos é devagar ocasionando uma perturbação no sistema que pode induzir a coleta de valores errados.

4.5 Agrupamento

Numa primeira etapa do tratamento da informação obtida no campo do trabalho, foi agrupada por tipo de instrumento para avaliar as correlações entre as leituras com o objetivo de validá-las.

Diferente do trabalho de Buzzi (2007) as leituras a serem obtidas neste monitoramento foram coletadas no mesmo dia e horário para cada instrumento devido ao fato de serem automatizadas, o que facilitou o agrupamento e tornou a base de dados válida para qualquer tipo de tratamento estatístico posterior, incluindo as correlações diretas.

4.6 Criação de diagramas de frequência e dispersão

Para a criação dos diagramas de frequência, se tomaram os valores já processados das leituras dos equipamentos. Na primeira etapa se plotaram estes valores com respeito à data de leitura para cada uma das famílias de instrumentos com a finalidade de observar a frequência e as oscilações que estes apresentam na série histórica.

Os resultados do tratamento anteriormente mencionado permitiram observar o comportamento dos instrumentos a partir da utilização de técnicas descritivas e gráficas já propostas para a análise das séries temporais.

Por exemplo, a Figura 29 apresenta um gráfico com as leituras de poro pressão dos piezômetros PZE 02, PZE 03, PZE 05 e PZE 06 ao longo do tempo. Cabe salientar que estes piezômetros encontram-se no mesmo tipo de solo o qual tem a característica de ser não saturado. Em este gráfico pode ser percebido que os piezômetros PZE 03, PZE 05 e PZE 06 apresentam uma frequência similar e algum tipo de correlação entre suas leituras, devido a que pode ser observada uma

sincronia entre as oscilações dos valores. No entanto, o piezômetro PZE 02 apresenta oscilações diferentes, podendo descrever que aparentemente não possui correlação nenhuma com os outros piezômetros.

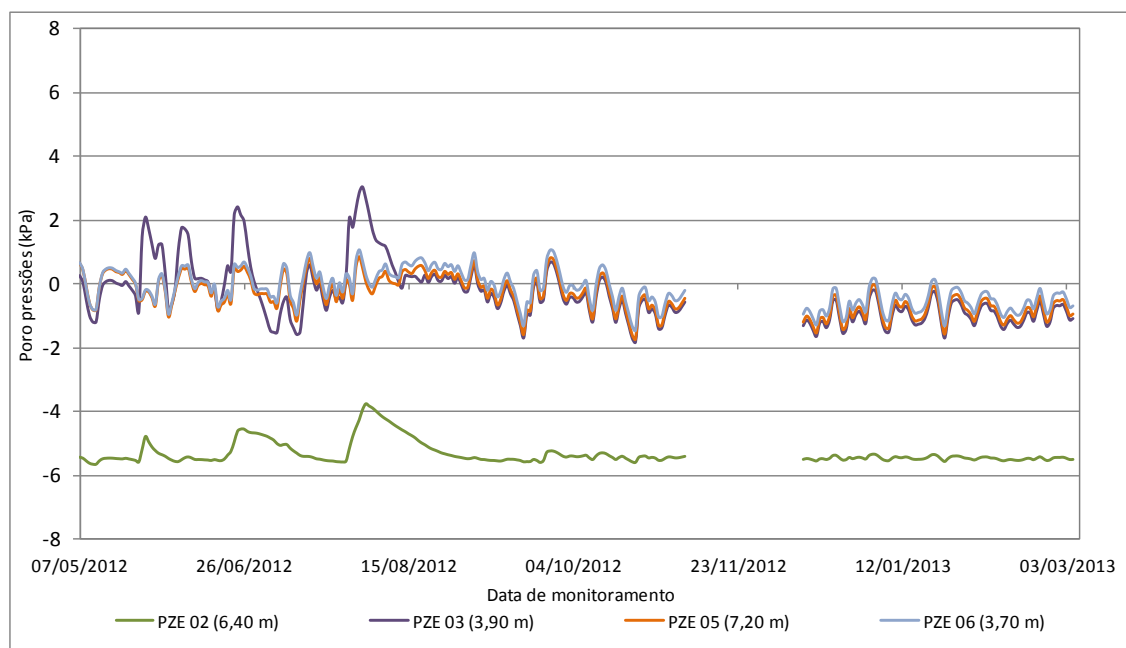


Figura 29 - Diagrama de dispersão onde se mostra a frequência de oscilação das leituras em quatro piezômetros distintos colocados na mesma faixa de profundidade correspondente a solo não saturado

Uma vez realizada a análise de oscilações e frequência, procede-se à utilização do diagrama de dispersão para determinar a correlação estatística de uma variável respeito à outra (instrumentos).

Esta etapa consiste em agrupar as leituras de duas variáveis e representá-las num gráfico (Figura 30). Os pontos obtidos no diagrama de dispersão são resultado de cada par de valores pertencentes às leituras de dois instrumentos realizadas em uma mesma data (Tabela 17).

Tabela 17 - Valores de leituras de poro pressões desde a data de início do monitoramento até a data final

Data	Hora	PZE-01 (8,60 m)	PZE-02 (6,40 m)	PZE-03 (3,90 m)	PZE-04 (8,65 m)	PZE-05 (7,20 m)	PZE-06 (3,70 m)
------	------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

07/05/2012	12:59	0,15	-5,43	0,26	-0,50	0,65	0,66
07/05/2012	13:28	0,15	-5,43	0,26	-0,50	0,64	0,66
07/05/2012	21:33	0,15	-5,43	0,26	-0,50	0,64	0,66
.	
.	
.	
06/03/2013	21:29	-0,85	-5,44	-0,71	-2,08	-0,56	-0,32
06/03/2013	22:30	-0,80	-5,44	-0,67	-2,08	-0,52	-0,28
06/03/2013	23:30	-0,82	-5,44	-0,71	-2,10	-0,55	-0,32

Cabe salientar que para realizar estes diagramas, as séries de leituras de cada instrumento foram discretizadas em séries históricas diárias calculadas pela média das variações, de modo a facilitar as representações gráficas e demais operações estatísticas.

Uma vez discretizadas as séries, foi criada uma base de dados com os valores destas leituras e realizados os diagramas de dispersão com o uso do programa MS Excel.

A partir destes diagramas, foram calculadas as linhas de tendência e obtidas as equações das retas além do valor do coeficiente de determinação “ r^2 ”.

Estes diagramas ajudaram no momento de analisar os valores dos coeficientes de determinação visto que graficamente se observou a não coerência entre algumas linhas de tendência e a dispersão dos pontos no gráfico.

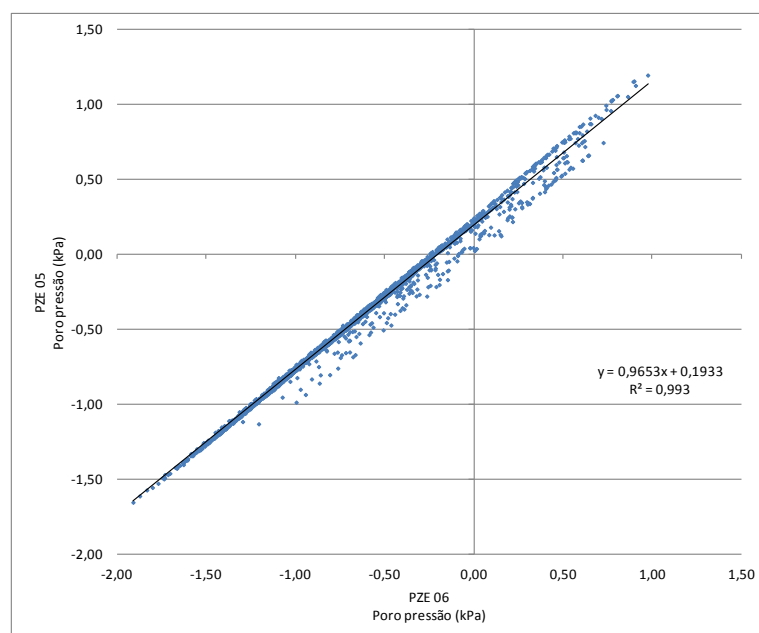


Figura 30 - Diagrama de dispersão para os piezômetros PZE 05 e PZE 06

A partir destes gráficos iniciais pode ser observada a existência ou não de correlação entre as leituras de pares de instrumentos (Figura 31).

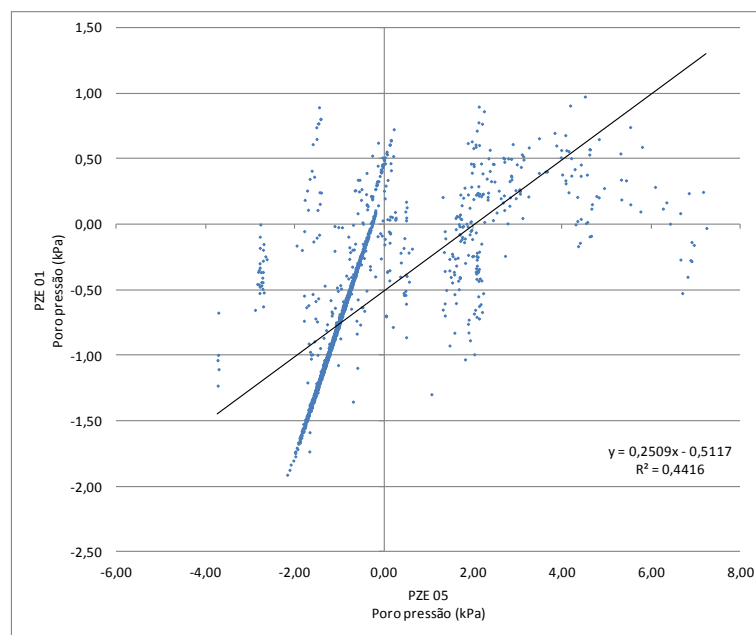


Figura 31 - Diagrama de dispersão para os piezômetros PZE 01 e PZE 05

5. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da abordagem descritiva das séries temporais do monitoramento da instrumentação e da aplicação de ferramentas estatísticas para a correlação entre leituras. Inicialmente, os resultados serão apresentados por tipo de instrumento. Em seguida, se procederá às análises de correlações entre os resultados e as precipitações.

Para realizar de maneira integrada a análise das leituras resultantes do monitoramento tanto no comportamento do solo como na análise de desempenho do sistema de contenção, é necessário considerar primeiramente a variável independente, neste caso, a chuva.

5.1 Análise das séries de leituras para a chuva

Os eventos pluviométricos são um dos fatores de principal interesse neste estudo. A influência que apresentam sobre as variações dos parâmetros do solo é condição principal para o entendimento e compreensão para o aprofundamento dos estudos e análises das séries de leituras.

5.1.1 Pluviógrafo

Com a finalidade de obter maior precisão na análise do comportamento da instrumentação com respeito às chuvas, foi implementado no sistema de monitoramento um pluviógrafo de caçambas basculantes que permitiu registrar as ocorrências de chuvas no local de estudo. A partir desses dados puderam ser realizadas as análises da influência das precipitações com respeito às variações nas leituras, principalmente as de poro pressão e sucção.

Na Figura 32 apresentam-se as ocorrências de eventos pluviométricos registrados diariamente no local de estudo, desde o começo do monitoramento (07 de maio de 2012) até a conclusão deste trabalho de pesquisa (06 de março de 2013).

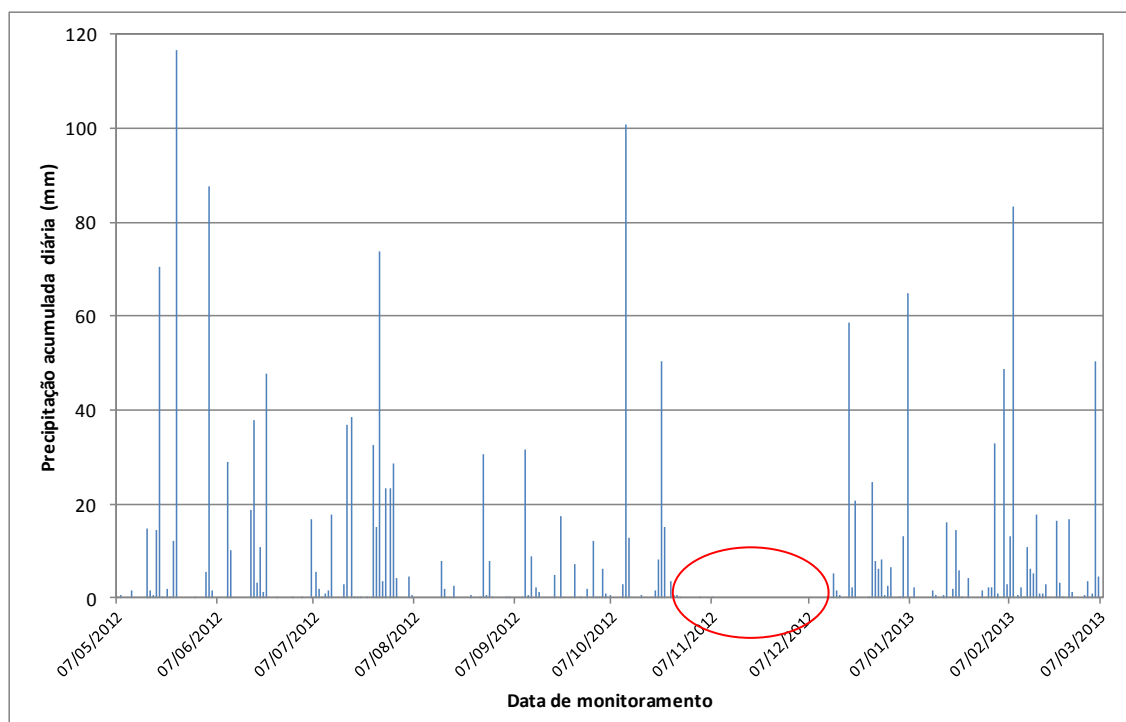


Figura 32 - Diagrama de frequência para as precipitações diárias acumuladas no local de estudo onde assinala-se um período sem leituras devido a problemas com o equipamento

Analisando-se as precipitações mês a mês, pode-se observar que em maio/2012 ocorreram eventos esporádicos, mas caracterizados por serem de grandes magnitudes. No total foram registrados 15 eventos que somaram 245,75 mm de chuva. Cabe salientar que neste mês obteve-se a maior leitura de precipitação ocorrida no período de monitoramento, a qual registrou 116,75 mm de chuva em aproximadamente 19 horas tendo como maior ocorrência 12,75 mm no período compreendido entre as 04:01 e 5:00 horas do dia 25 de maio.

O mês de junho caracterizou-se pela ocorrência de 13 eventos que totalizaram 254,25 mm de chuva, sendo a maior ocorrência registrada no dia 04 de junho com um valor de 87,50 mm em 22 horas, com o maior valor de precipitação por hora de 10,25 mm no período das 15:01 às 16:00 horas.

O mês de julho apresentou o maior acúmulo de precipitações entre todos os meses monitorados, alcançando os 325 mm em 22 eventos registrados. O máximo acumulado diário foi no dia 27 de julho, registrando-se 73,75 mm em 10 horas. Pode observar-se que neste mês a média de chuva por hora aumenta, alcançando os 18,25 mm no período das 5:01 às 6:00 horas para este máximo de acúmulo diário.

Os meses de agosto e setembro foram considerados como os meses de menos ocorrências em termos de quantidade de chuva, apresentando 11 eventos para o mês de agosto que totalizaram 57,50 mm acumulados com máxima de 30,75 mm no dia 28 em 21 horas. Já no mês de setembro, foram registrados 13 eventos para um acúmulo de 77,25 mm, sendo 31,75 mm o máximo acúmulo alcançado no dia 10.

Pode-se observar que no mês de outubro foram registrados 18 eventos acumulando 217,75 mm. O aumento significativo no valor do acúmulo deve-se a dois eventos, caracterizados por 100,75 mm de chuva ocorridos no dia 11 e 50,50 mm no dia 22. Nestes eventos as máximas intensidades de chuvas estiveram em 14 mm/h para o dia 11 e 16,75 mm/h para o dia 22.

Observa-se também que entre o mês de novembro e o mês de dezembro de 2012 existe uma ausência de registros de chuvas como consequência da obstrução do filtro do funil do pluviógrafo. Isto foi percebido pela equipe de monitoramento no dia 13 de dezembro de 2012 em uma visita para coleta de dados. Observou-se uma película impermeável formada por um material muito fino (provavelmente partículas de argila em suspensão ou pólen das plantas ao redor), material da vegetação, insetos e água estancada (Figura 33). Na última visita para coleta de dados, realizada no dia 07 de novembro de 2012, o equipamento havia sido verificado e confirmado que se encontrava sem obstruções. Devido a esse problema, no intervalo de tempo de 35 dias não se tem certeza de quando exatamente se deu a obstrução assim como quais chuvas ocorreram.



Figura 33 - Imagem onde pode se observar o entupimento do pluviôgrafo

A partir do dia 13 de dezembro, o pluviôgrafo registrou 14 eventos, com um total acumulado de 140 mm de chuva, com máximo de 58,50 mm e a peculiaridade de ter-se registrado 37 mm em um período de uma hora. Adicionalmente a este evento, no dia 26 de dezembro também foi registrado um evento de 24,75 mm acumulado diário com uma intensidade de 20,75 mm no período das 15:00 às 16:00 horas.

O mês de janeiro caracterizou-se por apresentar 16 eventos pluviométricos alcançando os 137 mm acumulados. A máxima ocorrência se deu no dia 06 de janeiro, com acúmulo de 65 mm, onde observou-se o registro de 47,50 mm de chuvas entre o período das 04:00 às 05:00 horas, sendo esta a maior intensidade observada durante o monitoramento.

No mês de fevereiro foram registrados 22 eventos que resultaram no acúmulo de 270,75 mm de chuvas. O máximo valor diário observado foi no dia 08, com 83,50 mm. Neste dia apresenta-se uma forte intensidade no horário entre as 16:00 e 17:00 horas, alcançando 38,75 mm de chuva. Este mês pode ser caracterizado como aquele com chuvas mais fortes quanto à intensidade horária. Além do evento do dia 08, nos dias 02 e 05 também observaram-se intensidades por hora elevadas, de 29,25 mm e 34,75 mm.

Os poucos dias de monitoramento correspondentes ao mês de março apresentam um total de 55,75 mm de chuva acumulada em quatro eventos, sendo o dia 05 o maior destes, com 50,75 mm.

No intuito de explicar os eventos que podem ter acontecido na encosta durante o período de não funcionamento do pluviógrafo buscaram-se dados de pluviometria próximo ao local de estudo. Identificou-se que o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) possui uma estação meteorológica de observação de superfície automática, instalada em junho de 2010 na localidade de Itajaí com nomenclatura ITAJAÍ-A868, localizada a 19 km a noroeste da encosta (Figura 34) Essa estação apresenta os registros contínuos das precipitações ocorridas desde o ano 2010 na localidade, sendo os meses de novembro e dezembro de 2012 os de principal interesse para a análise.

Com a finalidade de verificar as leituras realizadas com o pluviógrafo instalado no local de estudo, realizou-se a comparação (Figura 35) e a correlação (Figura 36) de precipitações dos dois locais. Observou-se que para os dois pluviógrafos a correlação da precipitação acumulada diária é de 0,76 e a precipitação acumulada mensal apresenta uma correlação direta mais forte, superior a 0,90 (Tabela 18).

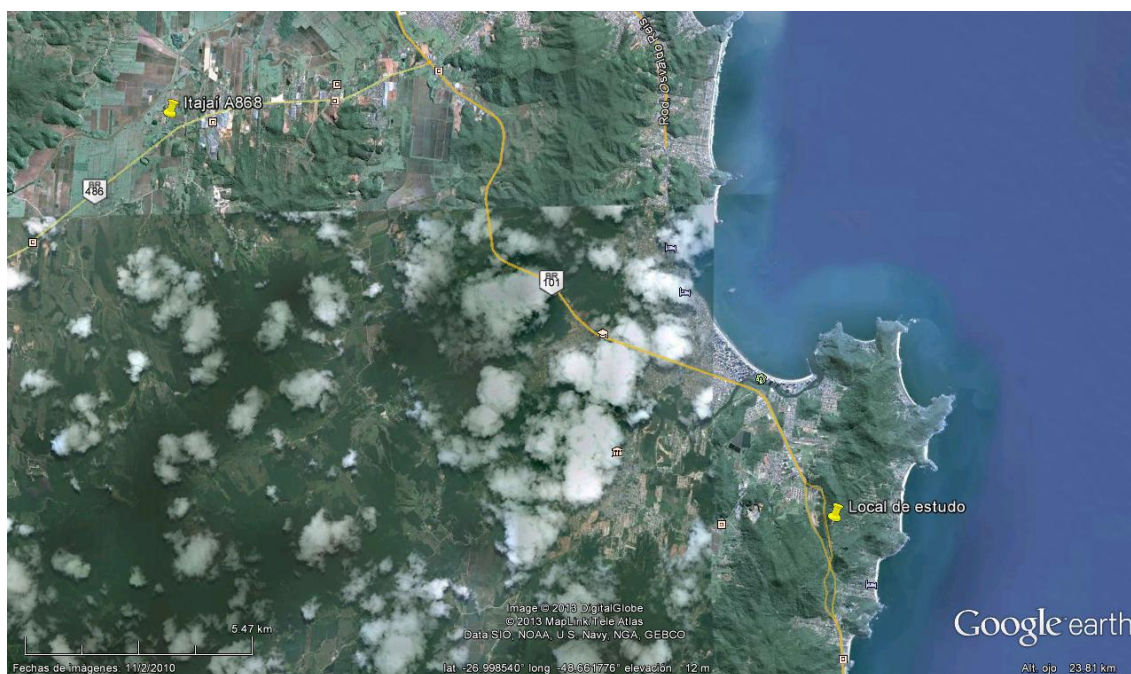


Figura 34 - Imagem referencial para localização da estação meteorológica do INMET e o local do estudo. Fonte: Google earth (2013)

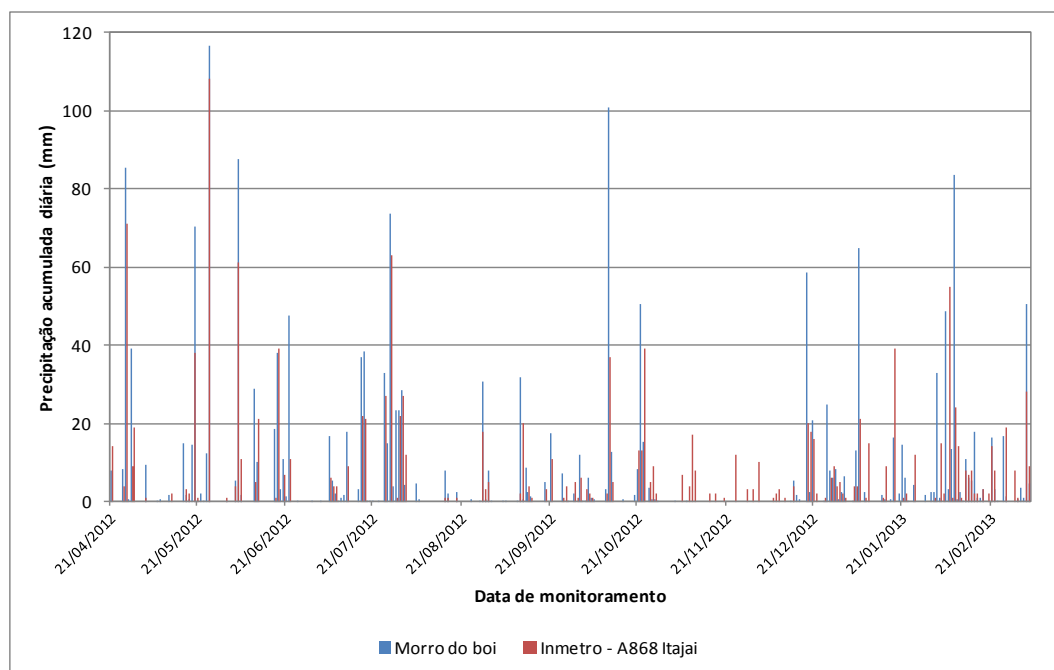


Figura 35 - Diagrama de frequências comparativo entre a estação meteorológica ITAJAÍ-A868 e o pluviômetro localizado no Morro do Boi

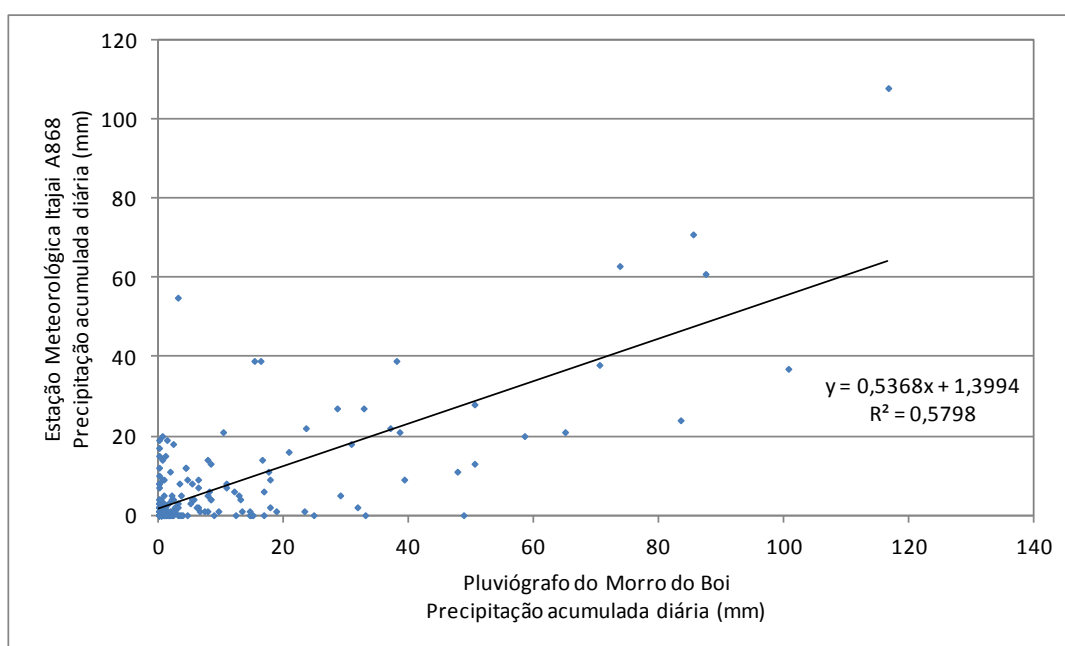


Figura 36 - Diagrama de dispersão para valores acumulados diários de precipitações entre o pluviômetro do Morro do Boi e a estação meteorológica Itajai A868

Tabela 18 - Matriz de correlação (Pearson) para as leituras acumuladas diárias do pluviômetro do Morro do Boi e a estação meteorológica ITAJAÍ-A868

Variáveis	Morro do Boi	Itajaí-A868 (INMET)
Morro do Boi	1	0,761
A868 Itajaí (INMET)	0,761	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

Em seguida, os valores acumulados mensais foram analisados (Tabela 19). A partir desses dados, gerou-se gráficos onde percebe-se a similaridade entre as precipitações acumuladas em cada mês (Figura 37). Também foi analisado o diagrama de dispersão para os valores acumulados mensais dos dois registros de dados com o cálculo do coeficiente de determinação " r^2 " (Figura 38) e a matriz de correlação direta para este par de pluviômetros (Tabela 20). Cabe salientar que os dados correspondem às datas onde houve informação em ambos os locais, com o fim de validar a correlação.

Tabela 19 - Tabela com os dados referentes aos registros de precipitações no pluviômetro do Morro do Boi e a estação meteorológica ITAJAÍ-A868

Ano	Mês	Morro do Boi (mm)	Itajaí -A868 (INMET) (mm)
2012	Abril	141,25	117
	Maio	245,75	156
	Junho	254,25	160
	Julho	325,00	206
	Agosto	61,75	41
	Setembro	77,25	52
	Outubro	217,75	137
	Novembro	0,5	0
	Dezembro	140	87
2013	Janeiro	137	110
	Fevereiro	270,75	186
	Março	55,75	37

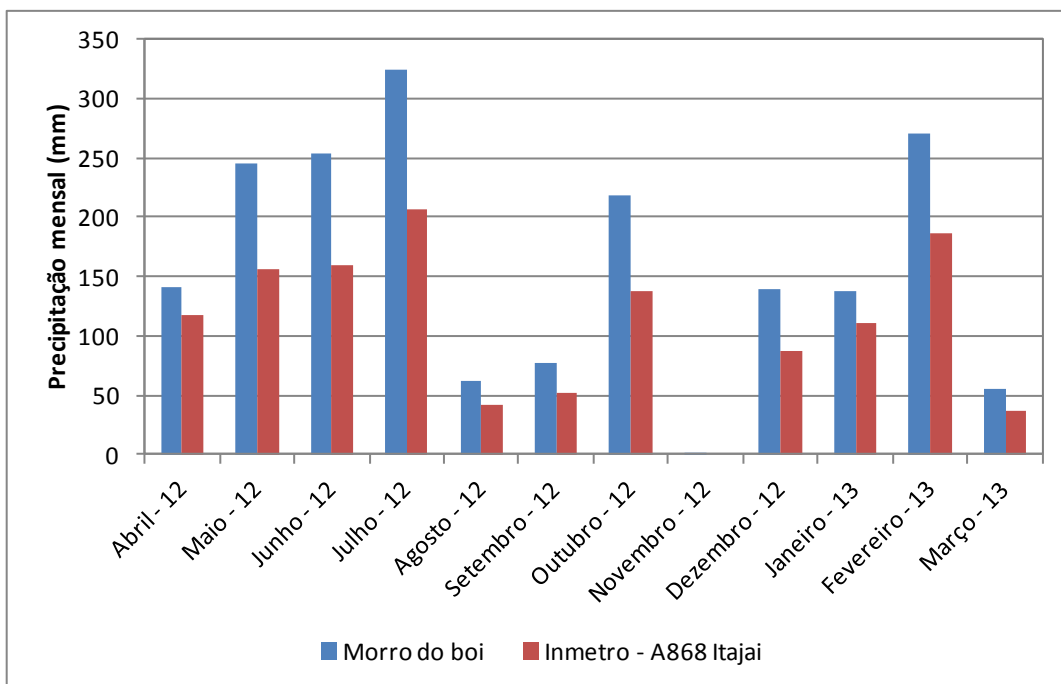


Figura 37 - Diagrama comparativo entre as precipitações acumuladas mensais para o pluviômetro do Morro do Boi e a estação meteorológica de Itajai A868

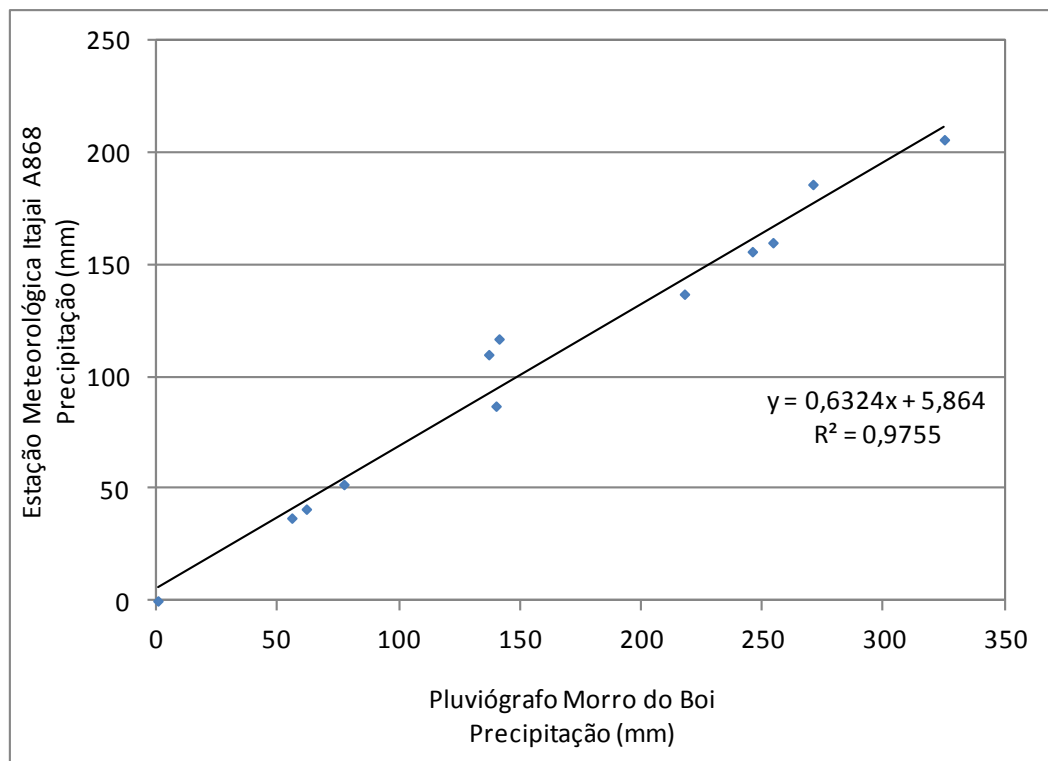


Figura 38 - Diagrama de dispersão para os dados correspondentes à estação meteorológica ITAJAÍ-A868 e o pluviômetro do Morro do Boi

Tabela 20 - Matriz de correlação (Pearson) para as leituras acumuladas mensais do pluviógrafo do Morro do Boi e a estação meteorológica ITAJAÍ-A868

Variáveis	Morro do Boi	Itajaí-A868 (INMET)
Morro do Boi	1	0,987
A868 Itajaí (INMET)	0,987	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

Os resultados das análises de correlação mostram que as leituras acumuladas mensais realizadas pelo pluviógrafo no Morro do Boi apresenta correlação alta comparado à estação meteorológica de Itajaí, mesmo estando estas separadas a uma distância de 19 km.

Nesta análise utilizou-se a discretização das séries de leituras de precipitações acumuladas diárias com a finalidade de se obter um nível de confiança maior para realizar as interpretações dos eventos ocorridos no local.

5.2 Análise das séries de leituras de instrumentos instalados para monitoramento do comportamento do solo

Com a finalidade de criar conhecimento sobre o comportamento do solo durante o período de monitoramento, neste item são apresentadas as séries de leituras obtidas para cada família de instrumentos em geral e análises específicas para aqueles agrupados em ilhas ou com profundidades de instalação equivalentes.

5.2.1 Piezômetros

Com respeito aos piezômetros, pode-se observar que estes apresentam uma certa semelhança quanto às variações no período estudado (Figura 39).

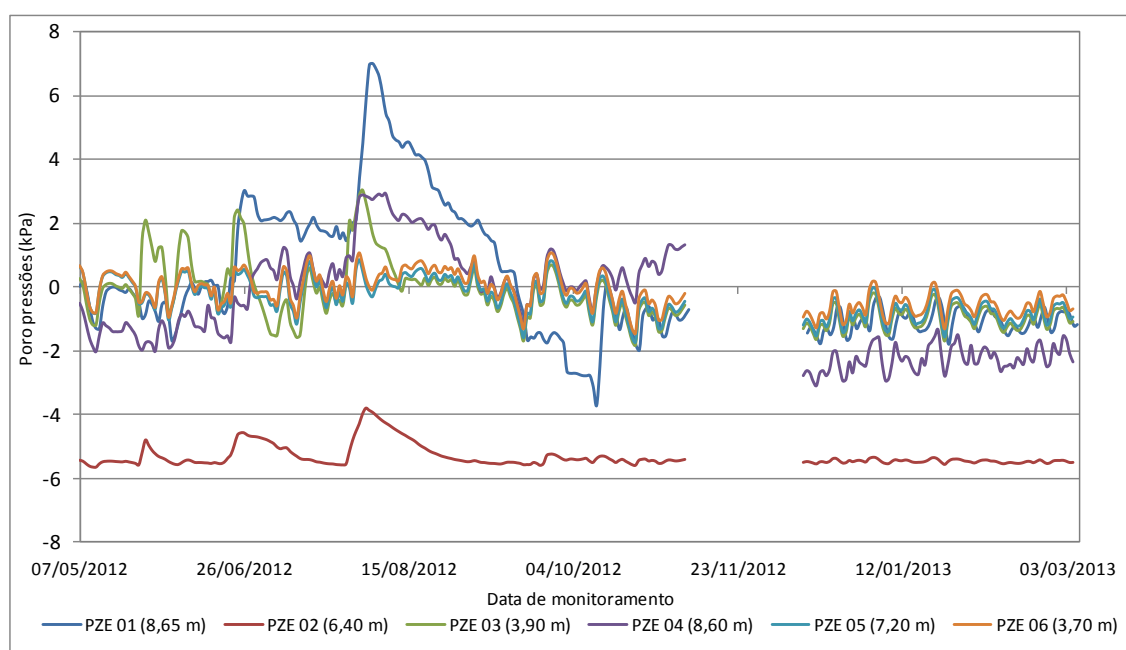


Figura 39 - Diagrama de frequências para os piezômetros.

Estas semelhanças podem ser atribuídas à profundidade de instalação e posicionamento em relação ao nível freático. Os sensores colocados abaixo deste nível apresentam variações maiores que aqueles instalados na zona não saturada. Isto pode ser observado de maneira mais detalhada na análise por instrumentos instalados em profundidades equivalentes.

Quanto à análise por ilhas, tem-se que na ilha intermediária correspondente aos piezômetros PZE-01, PZE-02, e PZE-03 as oscilações apresentam-se semelhantes no começo para os piezômetros PZE-01 e PZE-03, com aumentos e diminuições que podem ser definidas como apresentando uma relação e diferenciadas quanto ao piezômetro PZE-02, o qual apresenta leituras de poro pressões negativas, com estacionaridade em torno aos -5,5 kPa (Figura 40).

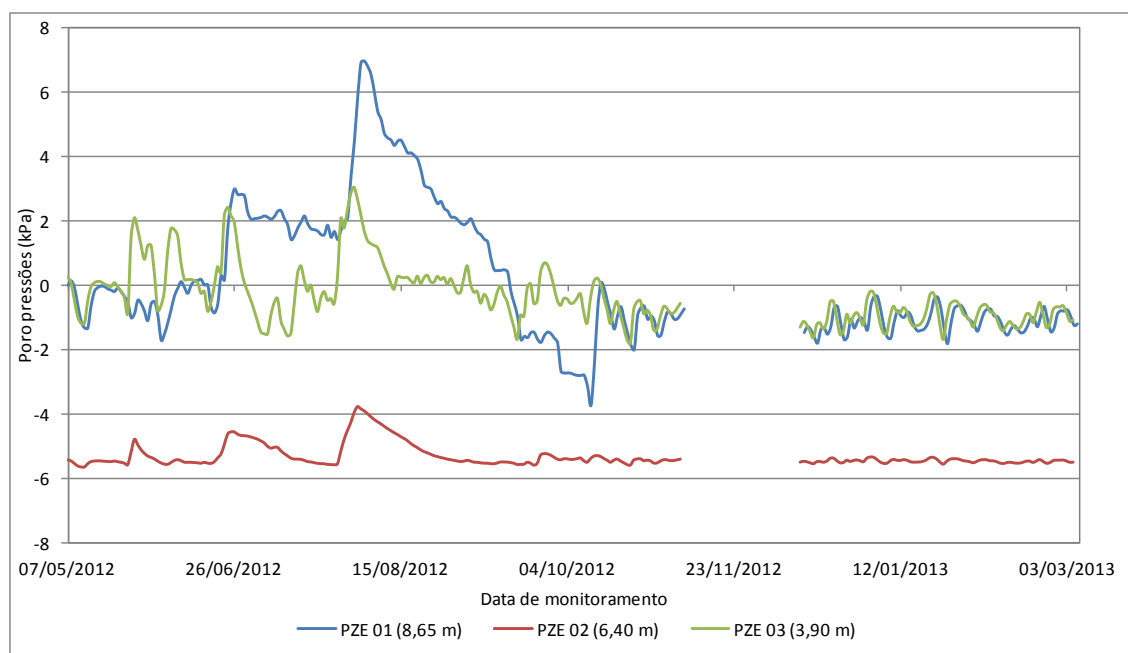


Figura 40 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-01, PZE-02 e PZE-03 localizados na ilha intermediária

A ilha superior instrumentada com os piezômetros PZE-04, PZE-05 e PZE-06, apresenta oscilações semelhantes nas séries de leituras, no começo e no final do período monitorado, descrevendo uma possível sazonalidade na série. Pode se observar também diferenças nas oscilações devido à profundidade de instalação (Figura 41).

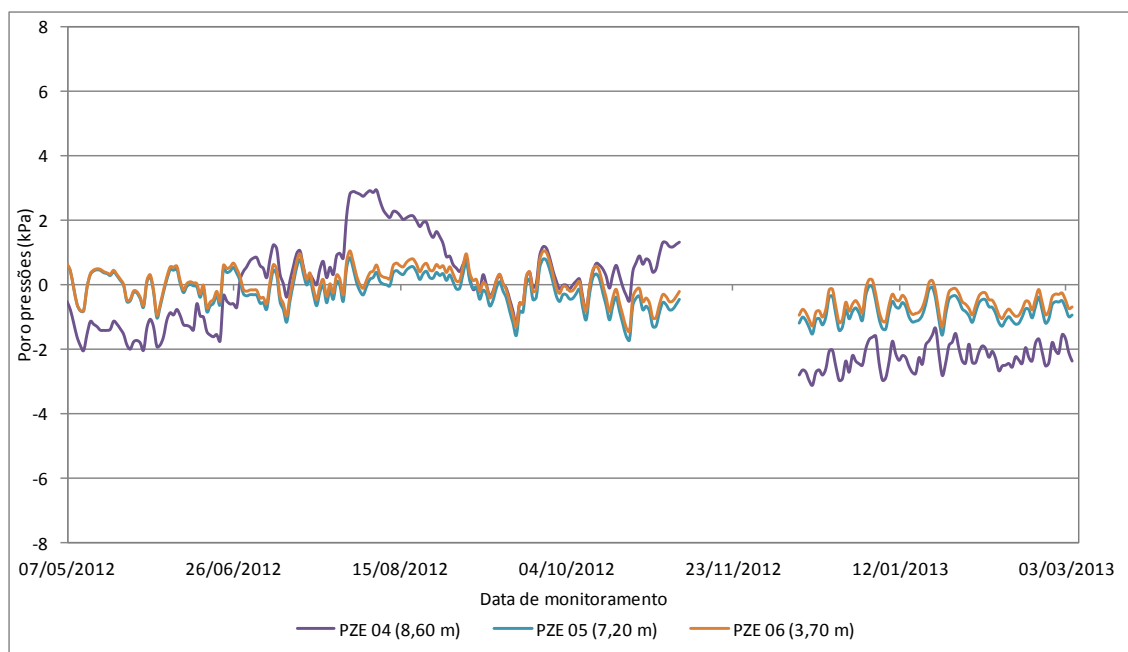


Figura 41 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-04, PZE-05 e PZE-06 localizados na ilha superior

Analisando-se o comportamento por profundidade de instalação, tem-se que para os instrumentos instalados em maior profundidade podem ser observadas mudanças significativas durante o período de monitoramento. Os valores de poro pressão começam a ser positivos entre o dia 22 de junho e 16 de setembro para o PZE-01, alcançando valores de até 7 kPa no dia 04 de agosto de 2012. O piezômetro PZE-04 registrou valores positivos de poro pressão entre o dia 28 de junho e o dia 07 de novembro, tendo o máximo no dia 06 de agosto com valor de 2,9 kPa e pequenas quedas em três momentos. Pode ser observado que no final do período de monitoramento estes instrumentos ficam com leituras negativas, oscilando entre 0 e -2 kPa para o PZE-01 e entre -1 e -3 kPa para o PZE-04 (Figura 42).

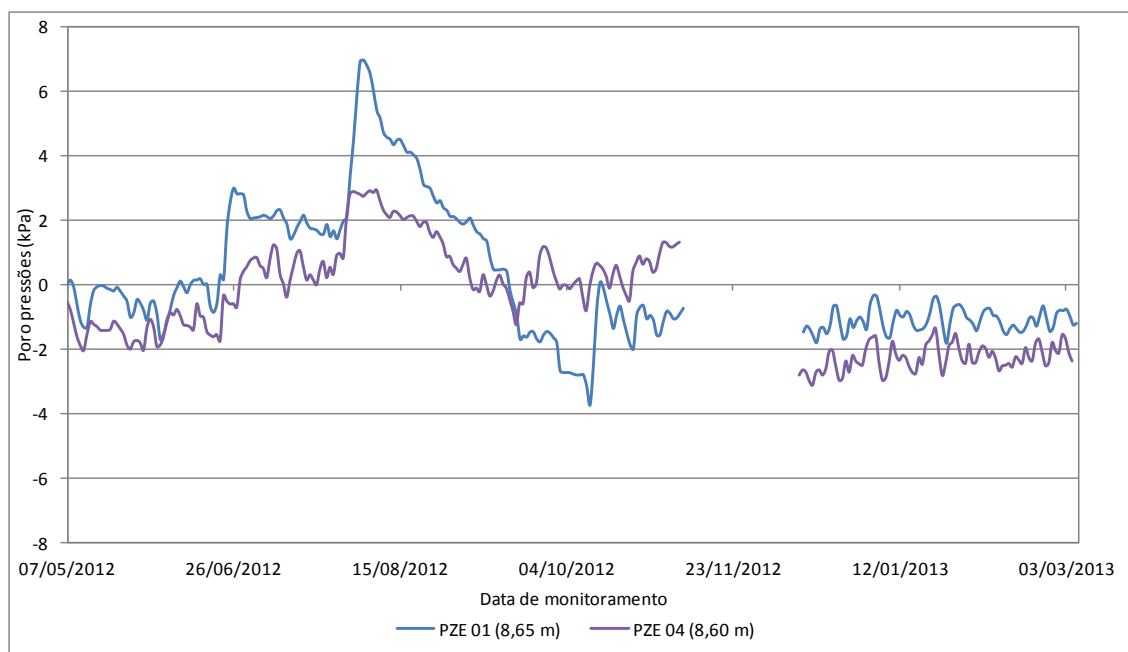


Figura 42 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-01 e PZE-04

Os piezômetros PZE-02 e PZE-05 instalados na profundidade de 6,40 m e 7,20 m apresentam um comportamento diferenciado quanto às oscilações e padrões de leituras. Pode observar-se que o piezômetro PZE-02 registrou valores de poro pressões negativas, com estacionaridade em torno aos -5,50 kPa. Já o piezômetro PZE-05 apresenta oscilações com valores entre 1 e -2 kPa durante os primeiros seis meses de monitoramento, diminuindo estas oscilações para o intervalo de 0 a -2 kPa no final do monitoramento (Figura 43).

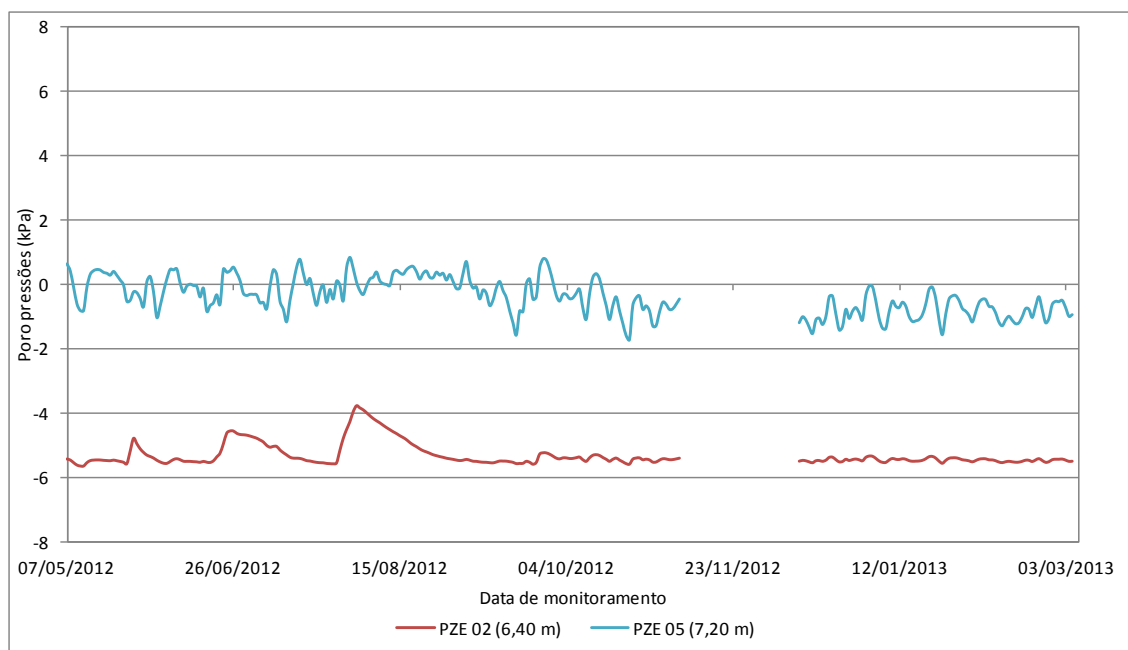


Figura 43 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-02 e PZE-05

Os piezômetros instalados mais superficialmente apresentam uma frequência de oscilação muito semelhante, podendo-se observar poro pressões positivas durante os primeiros 6 meses de monitoramento para depois diminuir as oscilações entre 0 e -2 kPa (Figura 44).

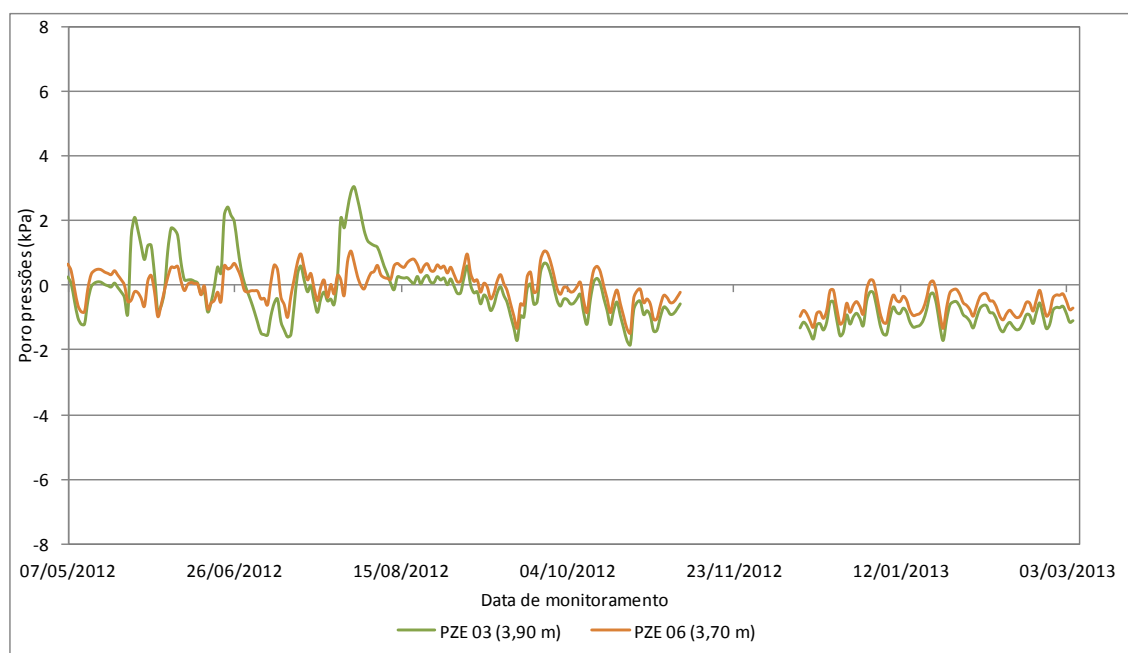


Figura 44 - Diagrama de frequência para os piezômetros PZE-03 e PZE-06

Para determinar as correlações existentes entre os piezômetros, realizaram-se os diagramas de dispersão para as séries de leituras destes instrumentos. Por exemplo, foi enfatizada a realização destes diagramas para ressaltar a possível relação entre os piezômetros PZE-02 e PZE-05, a qual se apresentou com magnitudes e frequências muito diferentes, estando estes instalados em profundidades e tipo de solo equivalente (contato rocha sã e rocha alterada) e comparadas com relação aos outros instrumentos instalados na zona não saturada.

Nas figuras apresentadas a seguir, mostram-se os diagramas de dispersão para o exemplo mencionado no parágrafo anterior, onde se observou a semelhança quanto à frequência entre as leituras dos piezômetros PZE 05 *versus* PZE 06, PZE 02 *versus* PZE 05, PZE 02 *versus* PZE 06, PZE 02 *versus* PZE 03, PZE 03 *versus* PZE 05, PZE 03 *versus* PZE 06 e o valor do coeficiente de determinação de cada correlação.

A Figura 45 apresenta o diagrama de dispersão para os dados obtidos das leituras dos piezômetros PZE-05 e PZE-06, observando-se a linearidade entre o par de valores das leituras ao longo do período de monitoramento.

Na Figura 46, o diagrama dos piezômetros PZE-02 e PZE-05 apresenta leituras dispersas e leituras alinhadas, sendo a linha de tendência resultante diferente do alinhamento apresentado pelo gráfico.

Do mesmo modo, a Figura 47 apresenta padrão similar à figura anterior, com dados dispersos e o alinhamento de outra porção de dados. Nesta figura observa-se também comportamento semelhante na linha de tendência obtida através dos cálculos estatísticos das leituras dos piezômetros PZE-02 e PZE-06.

Esta situação também pode ser observada na Figura 48, com os dados obtidos das leituras dos piezômetros PZE-02 e PZE-03, embora apresentando maior valor de coeficiente de correlação, porém grande dispersão nos pares de dados.

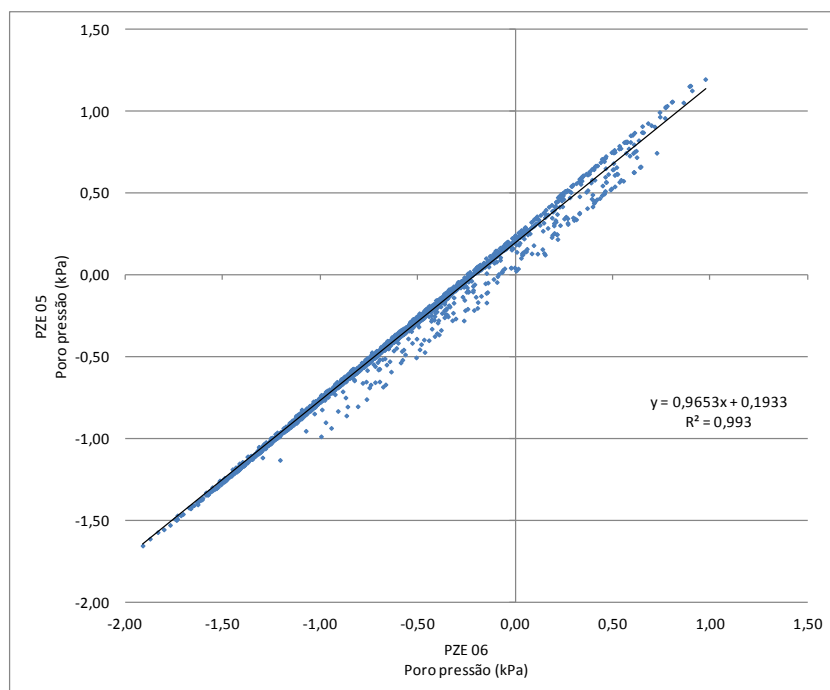


Figura 45 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos com uma frequência de oscilação similar. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 05-PZE 06

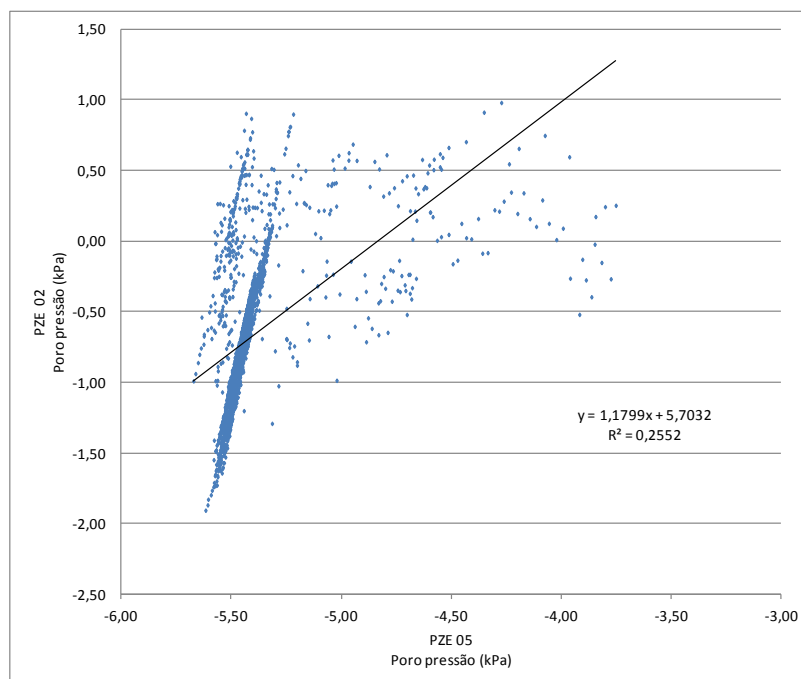


Figura 46 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 02-PZE 05

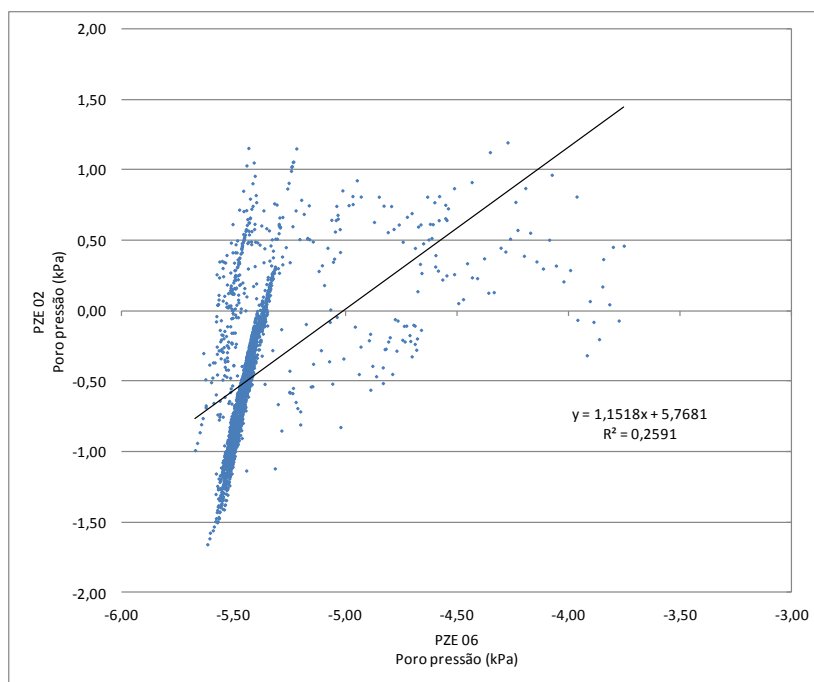


Figura 47 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 02-PZE 06

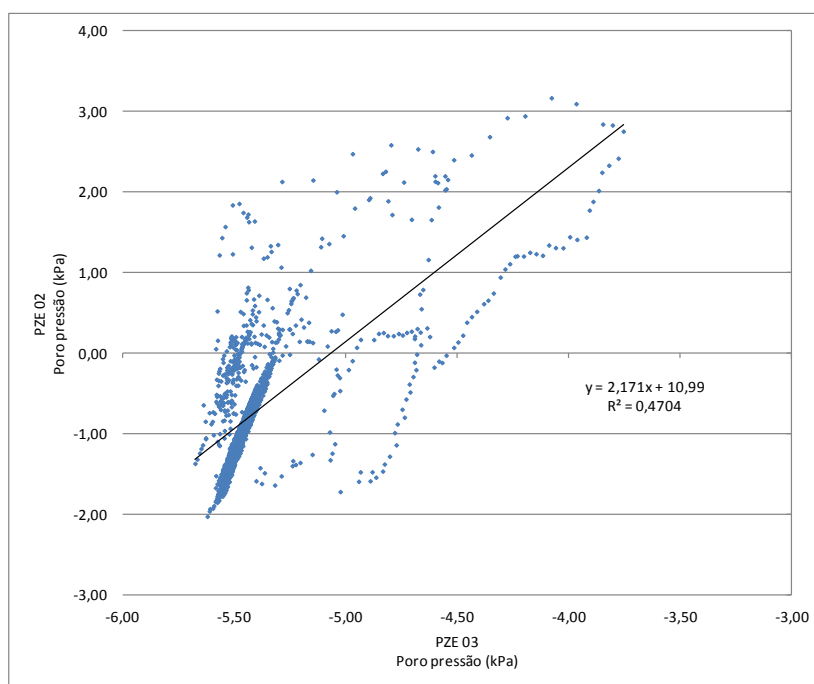


Figura 48 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 02-PZE 03

Diferentemente dos gráficos mostrados nas figuras anteriores, o diagrama de dispersão correspondente às leituras dos piezômetros PZE-03 e PZE-05, mesmo apresentando pares de dados dispersos teve um comportamento de maior linearidade (Figura 49). Para estes instrumentos observou-se uma linha de tendência mais ajustada, com coeficiente de determinação médio.

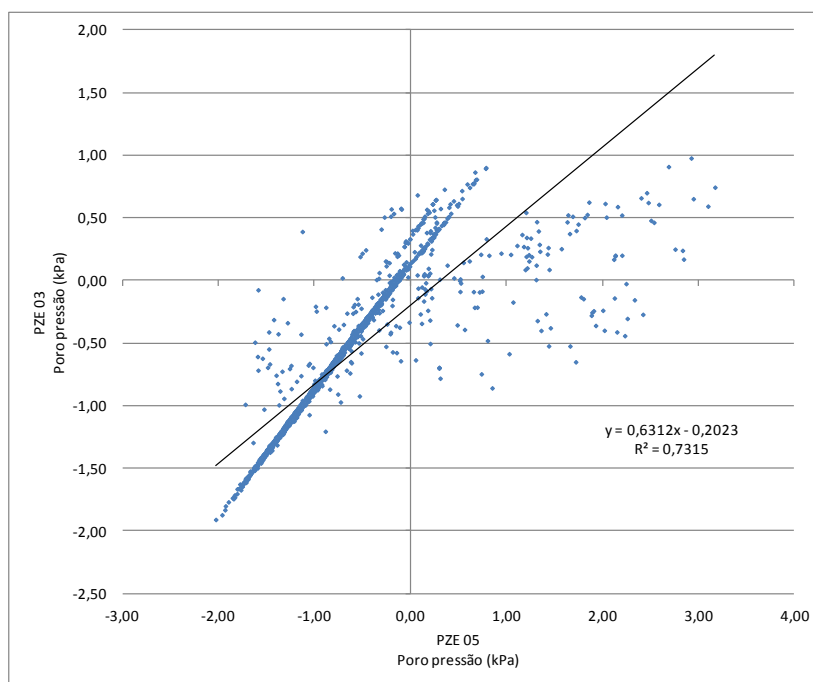


Figura 49 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 03-PZE 05

Quanto à dispersão dos dados entre os piezômetros PZE-03 e PZE-06, a Figura 50 mostra comportamento semelhante às relações anteriores, com dados dispersos e dados alinhados.

A tendência a linearidade observada nestes diagramas de dispersão descreve uma possível correlação a partir de certo período de leituras.

Com a finalidade de explicar esta tendência decidiu-se analisar estes resultados em períodos distintos, determinados através da observação na mudança da dispersão dos diagramas.

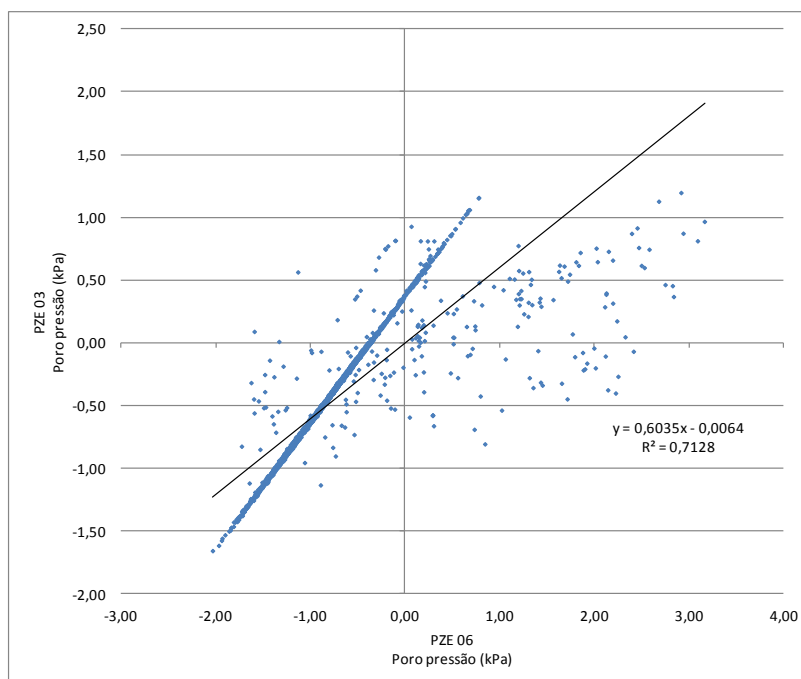


Figura 50 - Gráfico de dispersão onde se apresenta a correlação entre as leituras de dois instrumentos que apresentam uma frequência de oscilação diferente. Pode ser observada a equação da reta e o coeficiente de determinação da correlação entre os instrumentos PZE 03-PZE 06

Os resultados foram analisados estatisticamente para criar uma matriz de correlação de maneira a se comparar e visualizar os valores dos coeficientes, estabelecendo-se quais são os instrumentos que possuem maiores valores de correlação.

A Tabela 21 apresenta a matriz de correlação linear (Pearson) para a família de piezômetros, onde pode-se observar que as maiores correlações gerais apresentam-se nos instrumentos colocados na ilha superior, zona não saturada (PZE-05 e PZE-06), com coeficiente acima de 0,9. Outras correlações significativas encontram-se nos piezômetros colocados em ilhas diferentes e abaixo do lençol freático ou nível d'água (PZE-01 e PZE 04), com valores de coeficiente de correlação igual a 0,7.

O par de instrumentos com menor coeficiente de correlação encontrado nesta análise refere-se aos piezômetros 2 e 5 (PZE-02 e PZE-05), os quais se encontram em ilhas diferentes porém em profundidades e tipo de solo equivalentes, com valor de 0,41.

Quanto aos coeficientes de correlação entre instrumentos colocados na mesma ilha, tem-se que para aquela localizada no centro do sistema de contenção os valores estão entre 0,6 e 0,8, podendo-se definir a correlação como média a forte.

Os instrumentos colocados na ilha superior apresentam coeficientes de correlação entre 0,6 e 0,9, sinalizando correlações médias a muito fortes entre os mesmos.

Os coeficientes de correlação entre instrumentos de ilhas diferentes, na maioria, apresentam valores médios a baixos, o que pode significar que existem diferenças quanto ao tempo de resposta e intensidade da medição dependendo da localização e profundidade dos sensores.

Tabela 21 - Matriz de coeficientes de correlação entre os piezômetros e os eventos pluviométricos

	Pluviógrafo	PZE-01	PZE-02	PZE-03	PZE-04	PZE-05	PZE-06
Pluviógrafo	1	-0,10	-0,12	-0,07	-0,12	-0,09	-0,10
PZE-01	-0,10	1	0,79	0,60	0,72	0,58	0,60
PZE-02	-0,12	0,79	1	0,64	0,61	0,41	0,42
PZE-03	-0,07	0,60	0,64	1	0,50	0,76	0,74
PZE-04	-0,12	0,72	0,61	0,50	1	0,60	0,65
PZE-05	-0,09	0,58	0,41	0,76	0,60	1	0,99
PZE-06	-0,10	0,60	0,42	0,74	0,65	0,99	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

Uma vez elaborados os diagramas de dispersão para cada uma das relações entre instrumentos, percebeu-se que os diagramas apresentaram tendência linear, apesar de existirem pontos dispersos.

Quando as linhas de tendência foram calculadas pelos programas matemáticos (neste caso o Excel), percebeu-se que as mesmas não acompanharam tal comportamento linear. Procedeu-se então a uma análise detalhada.

Com a finalidade de melhorar a interpretação desse comportamento, foram realizados diagramas de dispersão para três períodos de leituras separados. O primeiro período foi desde o dia 07 de maio de 2012 até o dia 07 de agosto de 2012, o segundo período desde o dia 08 de agosto até o dia 07 de novembro de 2012, e o terceiro período desde o dia 13 de dezembro de 2012 até o dia 06 de março de

2013. Os resultados desta análise mostraram que durante o primeiro período os instrumentos apresentaram uma correlação baixa (Tabela 22), com aumentos e diminuições para alguns instrumentos no segundo período (Tabela 23), porém no terceiro período a maioria das correlações entre os instrumentos foram fortes, não sendo determinantes fatores como profundidade ou localização (Tabela 24).

Tabela 22 - Matriz de coeficientes de correlação para o primeiro período de leituras

	PZE-01	PZE-02	PZE-03	PZE-04	PZE-05	PZE-06
PZE-01	1	0,85	0,36	0,94	0,28	0,39
PZE-02	0,85	1	0,47	0,73	0,18	0,26
PZE-03	0,36	0,47	1	0,26	0,51	0,52
PZE-04	0,94	0,73	0,26	1	0,31	0,43
PZE-05	0,28	0,18	0,51	0,31	1	0,99
PZE-06	0,39	0,26	0,52	0,43	0,99	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

Tabela 23 - Matriz de coeficientes de correlação para o segundo período de leituras

	PZE-01	PZE-02	PZE-03	PZE-04	PZE-05	PZE-06
PZE-01	1	0,79	0,48	0,72	0,49	0,52
PZE-02	0,79	1	0,40	0,66	0,34	0,36
PZE-03	0,48	0,40	1	0,24	0,64	0,62
PZE-04	0,72	0,66	0,24	1	0,37	0,47
PZE-05	0,49	0,34	0,64	0,37	1	0,99
PZE-06	0,52	0,36	0,62	0,47	0,99	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

Tabela 24 - Matriz de coeficientes de correlação para o terceiro período de leituras

	PZE-01	PZE-02	PZE-03	PZE-04	PZE-05	PZE-06
PZE-01	1	0,96	0,99	0,82	0,99	0,99
PZE-02	0,96	1	0,97	0,73	0,99	0,96
PZE-03	1,00	0,97	1	0,81	0,99	0,99
PZE-04	0,82	0,73	0,81	1	0,82	0,82
PZE-05	0,99	0,99	0,99	0,82	1	1,00
PZE-06	0,99	0,96	0,99	0,82	0,99	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

Estes resultados descrevem o desenvolvimento ou evolução das correlações, apresentando uma semelhança muito forte no padrão de variações no último período.

Na Figura 51 apresentam-se as correlações calculadas anteriormente por períodos. De modo geral, verifica-se o aumento do coeficiente entre o primeiro e o terceiro período, porém, existe um par de instrumentos (PZE-01/PZE-04) onde o coeficiente diminui em relação ao obtido no primeiro período analisado.

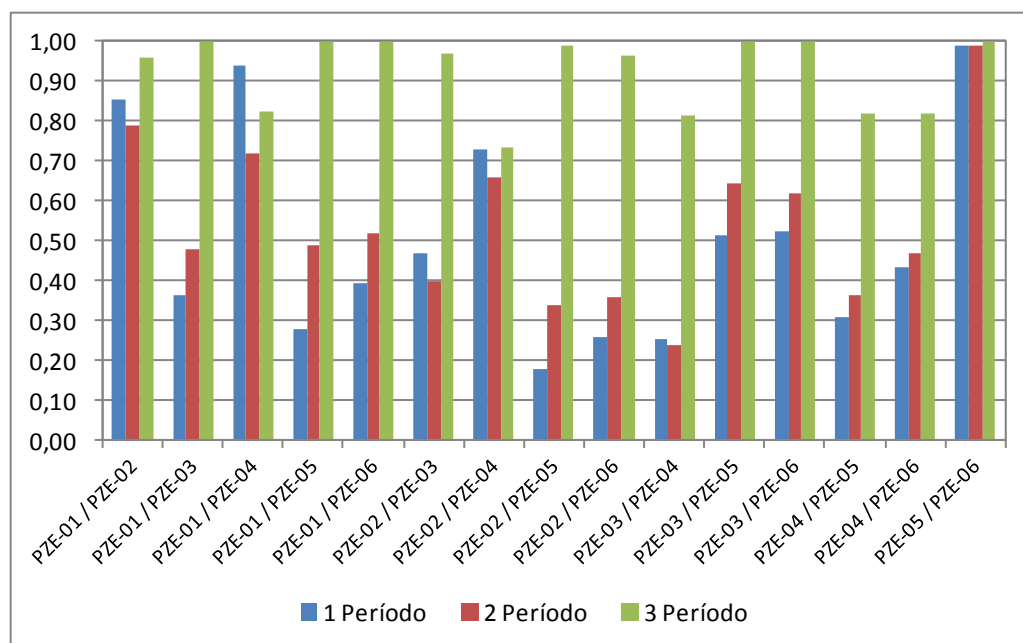


Figura 51 - Diagrama comparativo entre os valores de coeficientes de correlação para cada período estudado

Para compreender as variações nos valores destas correlações, devem ser agrupados os diagramas de frequência das leituras de instrumentos e a variável precipitação.

Agrupando-se os diagramas de frequência das leituras dos piezômetros com as leituras do pluviógrafo, obteve-se um diagrama (Figura 52), o qual foi utilizado para detectar as maiores variações nas leituras de poro pressões e revisar os eventos pluviométricos que pudessem explicar os aumentos deste parâmetro em relação à precipitação.

Pode-se observar que durante os 6 primeiros meses de monitoramento ocorreram quatro eventos que geraram picos significativos nas leituras. No decorrer desta análise serão avaliados os eventos anteriores a estes picos de leituras, no intuito de entender o porquê deste comportamento e a influência das precipitações.

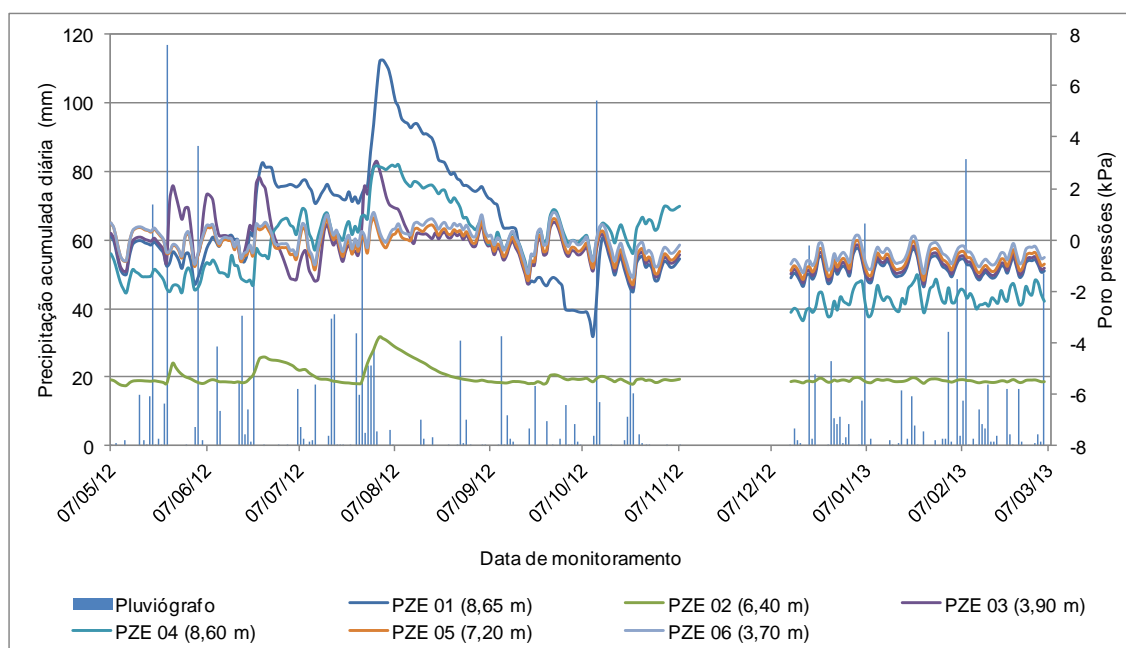


Figura 52 - Diagrama de frequência para comparação entre leituras dos piezômetros e ocorrência de precipitações

Entre os eventos pluviométricos a avaliar como responsáveis pelo aumento nos níveis de poro pressões mais relevantes encontram-se aqueles anteriores aos dias 27 de maio de 2012, 07 de junho de 2012, 24 de junho de 2012 e 03 de agosto de 2012, sendo nesta última data o maior aumento durante o tempo em que se realizou o monitoramento.

No dia 27 de maio de 2012 houve um aumento de poro pressão característico em todos os piezômetros instalados. Através da análise baseada na observação da curva de frequência percebe-se que esta alteração foi uma resposta aos eventos pluviométricos anteriores acumulados ao dia 27 de maio de 2012, com magnitudes entre 131,25 mm para 5 dias de acúmulo até 233,25 mm para 10 dias

de acúmulo. Cabe salientar que estas variações mostraram graficamente o valor máximo com atraso de dois dias a se iniciar no último evento pluviométrico ocorrido.

Uma análise similar foi realizada para o aumento nos valores de poro pressão do dia 07 de junho de 2012, onde se percebeu que a melhor aproximação ocorre com acúmulo de chuvas de 95 mm em 7 dias anteriores e com três dias de atraso iniciando no último evento pluviométrico. Quando se realizou esta análise observou-se também que no momento de se calcular os acúmulos, uma data anterior à data estudada apresentou valores consideráveis de precipitação acumulada (131,5 mm), explicando assim o aumento nas leituras dos piezômetros, mesmo sem ter ocorrido precipitação alguma nos 5 dias anteriores.

No dia 25 de junho de 2012 também foi percebido um aumento significativo nos valores de poro pressão. Uma vez realizada a análise, obteve-se como resultado que os valores de precipitação acumulada alcançaram os 119,75 mm em oito dias com um atraso variando entre um e três dias a partir da última precipitação. A mudança entre o tempo de resposta do instrumento pode estar relacionado à localização deste e à profundidade de instalação.

Após estas datas, entre os meses de agosto e setembro de 2012, observou-se uma diminuição gradual nos registros do piezômetro 1 (8,65 m) com uma variação de aproximadamente 8,3 kPa entre o valor máximo alcançado no dia 03 de agosto e o mínimo alcançado no dia 19 de setembro de 2012. Os eventos pluviométricos acumulados que geraram o aumento significativo nas leituras de poro pressões do piezômetro 1 para esta data refletiram no piezômetro 4 (8,60 m), atingindo o valor máximo no dia 08 de agosto de 2012 e diminuindo gradualmente até o dia 19 de setembro de 2012 quando apresentou variação de aproximadamente 4,16 kPa.

Após 19 de setembro de 2012, houve um aumento nas leituras da maioria dos piezômetros com exceção do piezômetro 1, o qual apresentou variação em pequenas magnitudes até a diminuição nos valores das leituras no dia 10 de outubro quando, observa-se uma queda ou mínimo geral nos instrumentos para então ocorrer a estabilização entre 0 e -2 kPa.

Já para as datas posteriores, os instrumentos tem apresentado estabilidade, mantendo oscilações entre ± 2 kPa para acúmulos de eventos pluviométricos da ordem dos 80 mm, o que pode ser interpretado como sendo a carga de infiltração que mantém-se baixa devido à pouca precipitação ocorrida entre os meses de dezembro e março, e possivelmente pelo crescimento da vegetação que pode agir como fator que reduz a infiltração.

Observa-se que quando se realizam as análises das poro pressões devem ser tomadas em conta não as precipitações do dia ou do dia anterior, mas sim, de pelo menos 5 dias, devido a estas variações serem produzidas pelos acúmulos. Cabe salientar que estas variações podem apresentar picos em dias que não há ocorrência de chuvas.

Quanto à análise das séries de leituras dos piezômetros, observa-se que estas se apresentam como uma série de dados discreta, com tendência a diminuição dos valores entre as oscilações marcados por períodos secos ou de poucas precipitações e períodos úmidos.

Analisando os padrões de chuvas durante o monitoramento foi observado que nos primeiros meses os eventos pluviométricos caracterizaram-se por serem de baixa intensidade de chuva por hora, tendo máximas de até 14 mm/h durante 19 horas, que conseqüentemente conseguiram maior infiltração no solo. Os últimos meses de monitoramento caracterizaram-se por ter precipitações com intensidades de até 47,5 mm/h o que gera mais escoamento que infiltração.

5.2.2 Tensiômetros

Os tensiômetros apresentam uma tendência de variação similar durante os primeiros três meses de monitoramento. Após estes primeiros três meses, pode ser observada uma mudança na tendência dos dados fornecidos pelos instrumentos instalados a menor profundidade, mais especificamente o aumento dos valores de sucção do tensiômetro 3 posicionado a 0,50 m de profundidade (Figura 53).

Também pode ser notadas variações nos instrumentos dependendo da sua localização na encosta. Por exemplo, o tensiômetro 1 (1,00 m) e o tensiômetro 2 (2,00 m) a partir do mês de dezembro (mês com uma baixa precipitação) experimentaram aumentos nos níveis de sucção, possivelmente associados à sua localização na parte mais íngreme da encosta e mais exposta à incidência solar, além de apresentar a maior presença de vegetação e o solo ser caracterizado como colúvio.

Por outro lado, tem-se a ilha de tensiômetros superior composta pelos tensiômetros 7 (1,00 m) e 8 (2,00 m), os quais apresentam ao longo do tempo de monitoramento valores de sucção relativamente baixos e constantes, e que comparado aos mesmos fatores anteriormente mencionados, não apresentam muita exposição ao sol e possuem escassa vegetação ao redor, o que pode significar que neste local a umidade é mantida. Porém, os valores de sucção apresentam uma leve tendência ao aumento a partir do mês de dezembro assim como os outros instrumentos, possivelmente pela ausência de precipitações.

Na ilha intermediária, os tensiômetros têm registrado leituras estáveis, à exceção do tensiômetro 3 (0,50 m) como já mencionado anteriormente, que têm apresentado aumento nos valores de sucção desde o começo do segundo trimestre de monitoramento, possivelmente como consequência do aumento da vegetação circundante. Para os demais tensiômetros observam-se leituras estáveis com tendência ao aumento gradual dos valores de sucção. Este comportamento poderia ser atribuído também à vegetação e pouca infiltração.

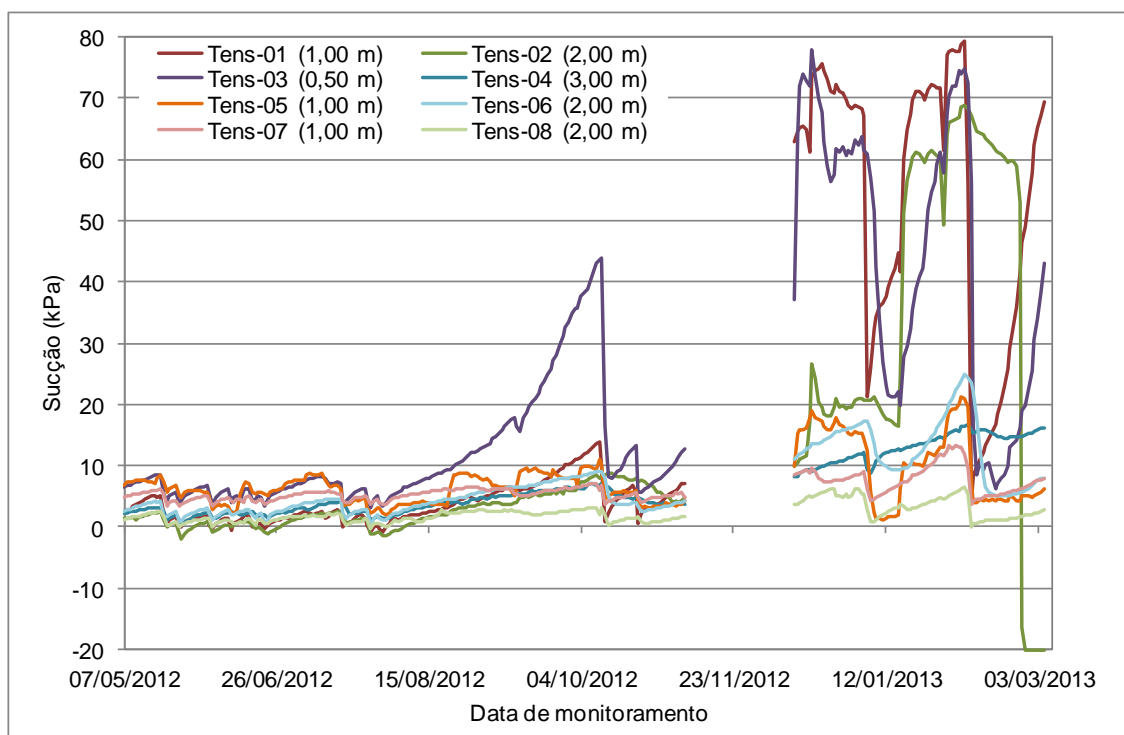


Figura 53 - Diagrama de frequência para a família de tensiômetros

Na sequência, apresentam-se os gráficos resultantes da análise de tendência de variação dos instrumentos colocados na mesma ilha de monitoramento e diferente profundidade.

Para o tensiômetro 1 e o tensiômetro 2, instalados no ponto mais baixo do sistema de contenção e a 1,00 e 2,00 m de profundidade respectivamente, pode observar-se uma tendência similar nas leituras durante os cinco primeiros meses de monitoramento, caracterizando-se por valores baixos de sucção efetiva (Figura 54). As leituras aparecem como irregulares e pouco correlacionáveis entre o dia 10 de outubro e 7 de novembro, para logo crescerem de maneira abrupta a partir do dia 13 de dezembro de 2012.

Pode observar-se que durante os últimos três meses de monitoramento estes instrumentos apresentam leituras de sucção elevada, com algumas quedas abruptas.

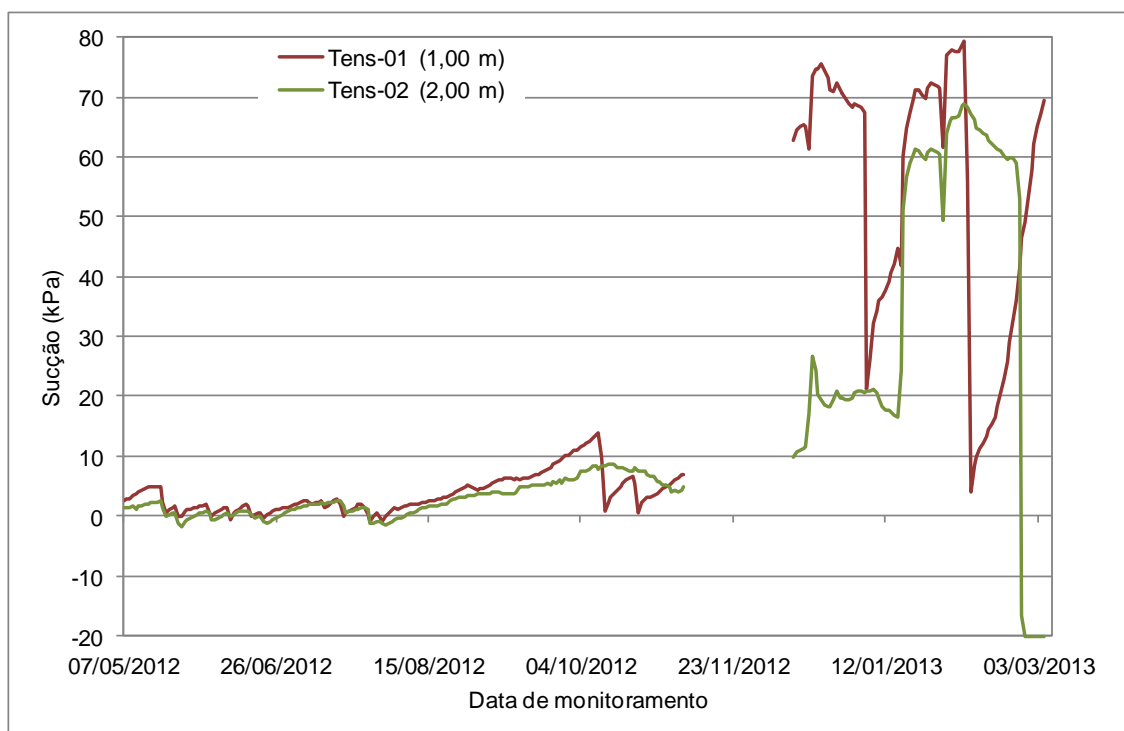


Figura 54 - Diagrama de frequência para os tensiômetro 1 e tensiômetro 2 correspondentes à parte inferior do sistema de contenção

Em relação à ilha de tensiômetros localizada na parte média do sistema de contenção observou-se que o tensiômetro 3 apresenta um aumento gradual na sucção a partir do dia 01 de agosto de 2012. Este aumento na sucção medida pelo instrumento pode corresponder à ausência de precipitações neste período, à profundidade de instalação do instrumento, visto que este se encontra próximo à superfície, e possivelmente devido à influência da vegetação.

Em geral esta ilha de instrumentos apresenta no final do período de monitoramento concernente a esta dissertação uma tendência dos valores de sucção dos instrumentos estarem experimentando um leve aumento (Figura 55). Como responsáveis por este comportamento podem ser considerados o crescimento da vegetação, a exposição ao sol desta área e a pouca ocorrência de chuvas durante os últimos meses.

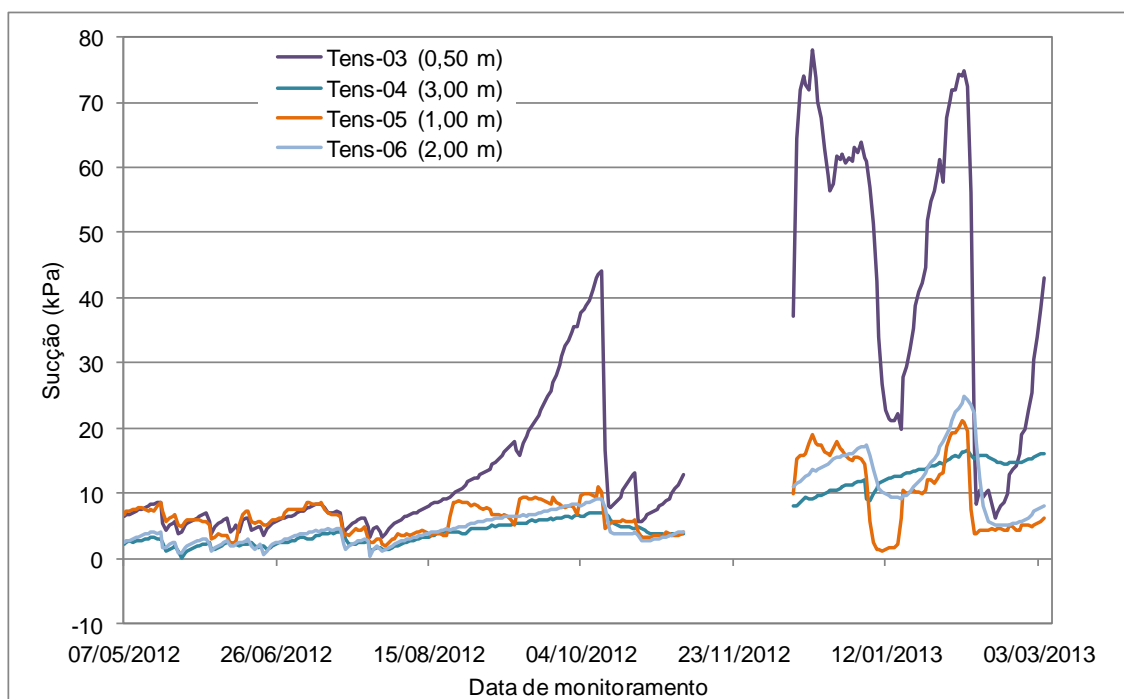


Figura 55 - Diagrama de frequência para os tensiômetros 3, 4, 5 e 6 pertencentes à ilha localizada no médio do sistema de contenção

Os tensiômetros 7 e 8, localizados na parte superior do sistema de contenção, apresentam oscilações similares ao longo do período de monitoramento, com valores de sucção nos primeiros seis meses entre 2,5 kPa e 7,9 kPa para o tensiômetro 7 (1,00 m), e entre -0,8 e 3,4 kPa para o tensiômetro 8 (2,00 m). Embora este par de instrumentos tenha apresentado no começo do monitoramento oscilações similares e valores baixos de sucção pode ser observado que a partir do mês de dezembro o comportamento destes têm seguido a tendência geral dos demais instrumentos, com aumento dos valores (Figura 56).

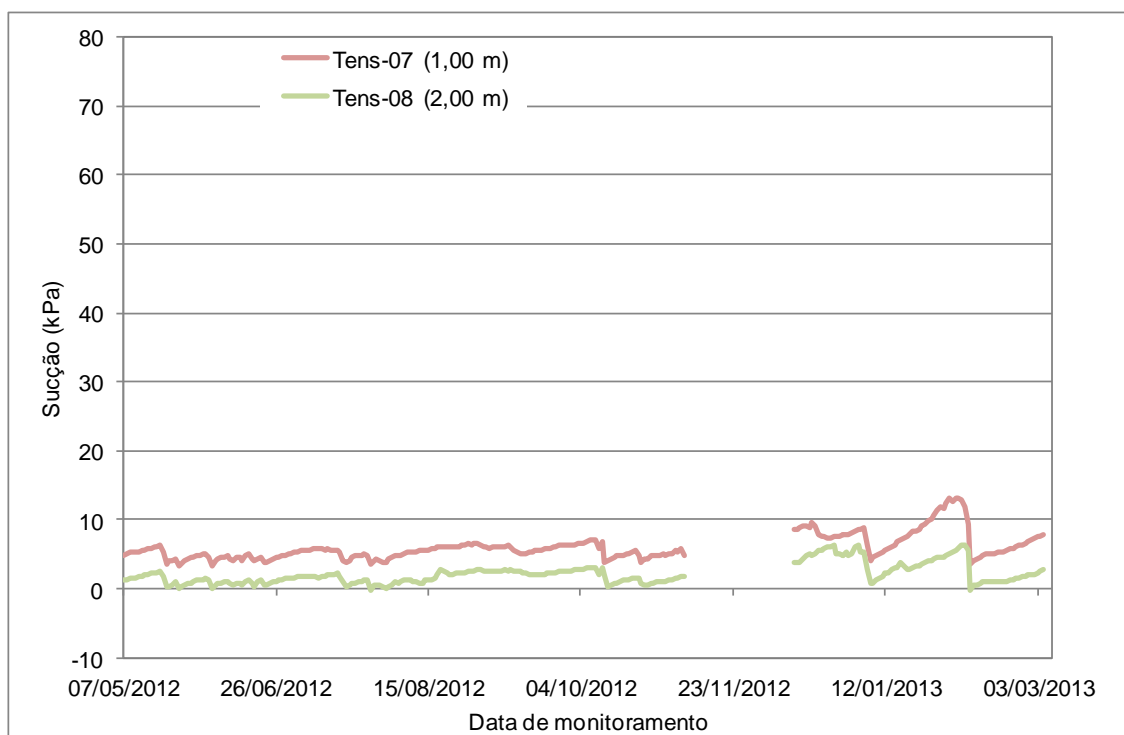


Figura 56 - Diagrama de frequência para os tensiômetros 7 e 8 localizados na parte superior do sistema de contenção

A análise de correlação entre a família de tensiômetros tem como resultado a matriz de coeficientes de correlação apresentada na Tabela 25.

Tabela 25 - Matriz de coeficientes de correlação obtido para os tensiômetros durante o monitoramento

Variáveis	Tens 1 (1,00 m)	Tens 2 (2,00 m)	Tens 3 (0,50 m)	Tens 4 (3,00 m)	Tens 5 (1,00 m)	Tens 6 (1,00 m)	Tens 7 (1,00 m)	Tens 8 (2,00 m)
Tens 1 (1,00 m)	1	0,711	0,857	0,851	0,737	0,858	0,776	0,790
Tens 2 (2,00 m)	0,711	1	0,500	0,831	0,413	0,663	0,755	0,424
Tens 3 (0,50 m)	0,857	0,500	1	0,669	0,834	0,904	0,719	0,756
Tens 4 (3,00 m)	0,851	0,831	0,669	1	0,435	0,846	0,740	0,636
Tens 5 (1,00 m)	0,737	0,413	0,834	0,435	1	0,724	0,721	0,798
Tens 6 (1,00 m)	0,858	0,663	0,904	0,846	0,724	1	0,780	0,766
Tens 7 (1,00 m)	0,776	0,755	0,719	0,740	0,721	0,780	1	0,734
Tens 8 (2,00 m)	0,790	0,424	0,756	0,636	0,798	0,766	0,734	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

A partir desta matriz de correlação de Pearson, pode concluir-se que os tensiômetros apresentam de uma maneira geral uma correlação média a forte, com exceção da inter-relação entre os tensiômetros 2 e 8, a qual apresenta coeficiente de correlação baixo apesar de encontrar-se na mesma profundidade (2,00 m, embora em ilhas diferentes).

A relação entre os tensiômetros 2 e 3, instalados a uma profundidade de 2,00 m e 0,50 m respetivamente e em ilhas diferentes, e entre os tensiômetros 2 e 5, colocados a profundidades de 2,00 m e 1,00 m e ilhas diferentes, mostram valores baixos de correlação. Esta diferença ou ausência de correlação nas leituras pode ser dada pela localização dos instrumentos além da profundidade de instalação, que implica em diferenças nas características do solo.

Apesar do tensiômetro 2 mostrar um coeficiente de correlação baixo em relação aos três instrumentos, tem-se que este apresenta uma correlação forte em relação ao tensiômetro 4 (3,00 m instalado em uma ilha diferente e a profundidades diferentes), correlação forte com respeito ao tensiômetro 7 (1,00 m, instalado na parte superior do sistema de contenção) e correlação média com respeito aos tensiômetros 6 e 1 (1,00 m, instalados na parte intermediária e inferior do sistema de contenção).

Entre os instrumentos com coeficiente de correlação baixo, tem-se também os tensiômetros 4 e 5, colocados na mesma ilha, em profundidades de 3,00 m e 1,00 m respetivamente. Esta falta de sincronia (correlação) entre as leituras pode ser interpretada como causada pela diferença de profundidade entre eles e pelo tipo de solo onde se encontram.

Para maior compreensão destes comportamentos deve ser integrada a incidência de precipitações na análise das séries de leituras dos tensiômetros. A partir desta análise observou-se que as variações dos valores de sucção no solo estão diretamente relacionadas à influência das precipitações e à granulometria areno-siltosa dominante, a qual permite respostas imediatas no mesmo dia do evento pluviométrico na maioria dos instrumentos.

Na Figura 57 apresenta-se as leituras dos tensiômetros juntamente com a ocorrência de precipitações no local de estudo no período de monitoramento.

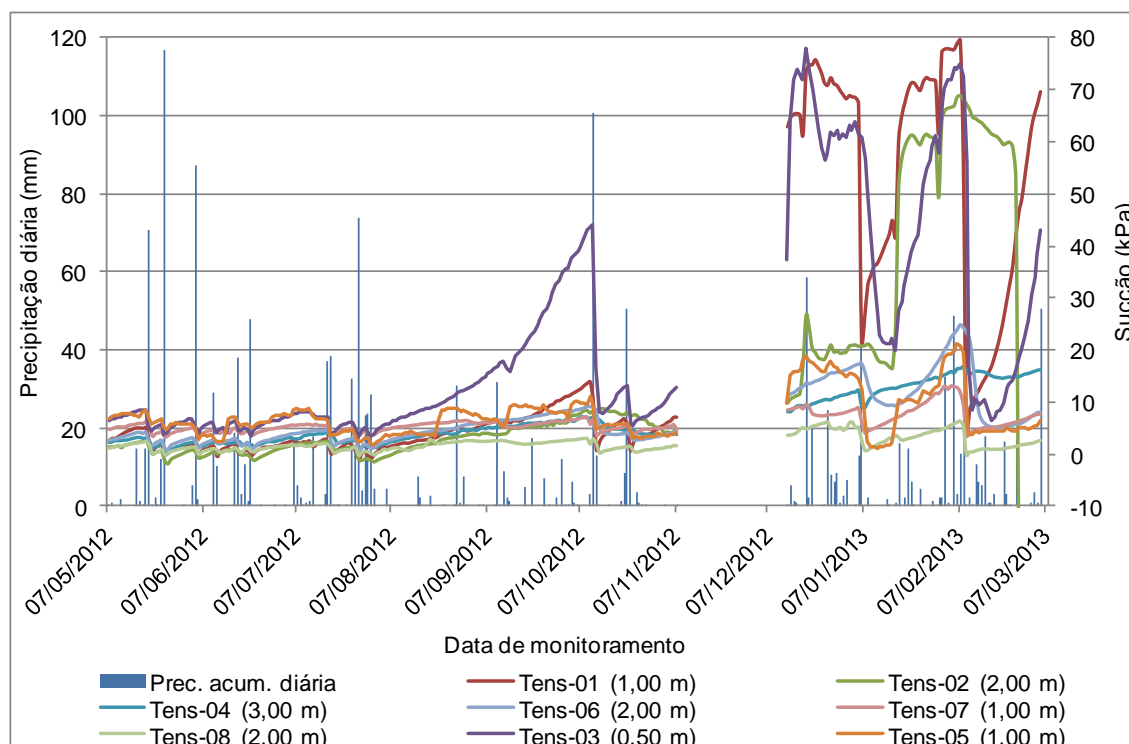


Figura 57 - Diagrama de frequência das leituras dos tensiômetros e ocorrência de precipitações acumuladas diárias

Na análise por ilhas, têm-se que na parte inferior do sistema de contenção correspondente aos tensiômetros 1 e 2 (1,00 m e 2,00 m) as leituras apresentam variações leves a respeito dos primeiros três meses de monitoramento, mantendo-se por baixo dos 10 kPa como consequência dos eventos pluviométricos consecutivos (maior frequência de precipitações). Já no segundo trimestre os valores de sucção mantêm uma tendência de aumento com quedas abruptas nas leituras do tensiômetro 1 e graduais no tensiômetro 2, provocadas pelos eventos pluviométricos ocorridos nos dias 11 e 20 de outubro de 2012 (Figura 58).

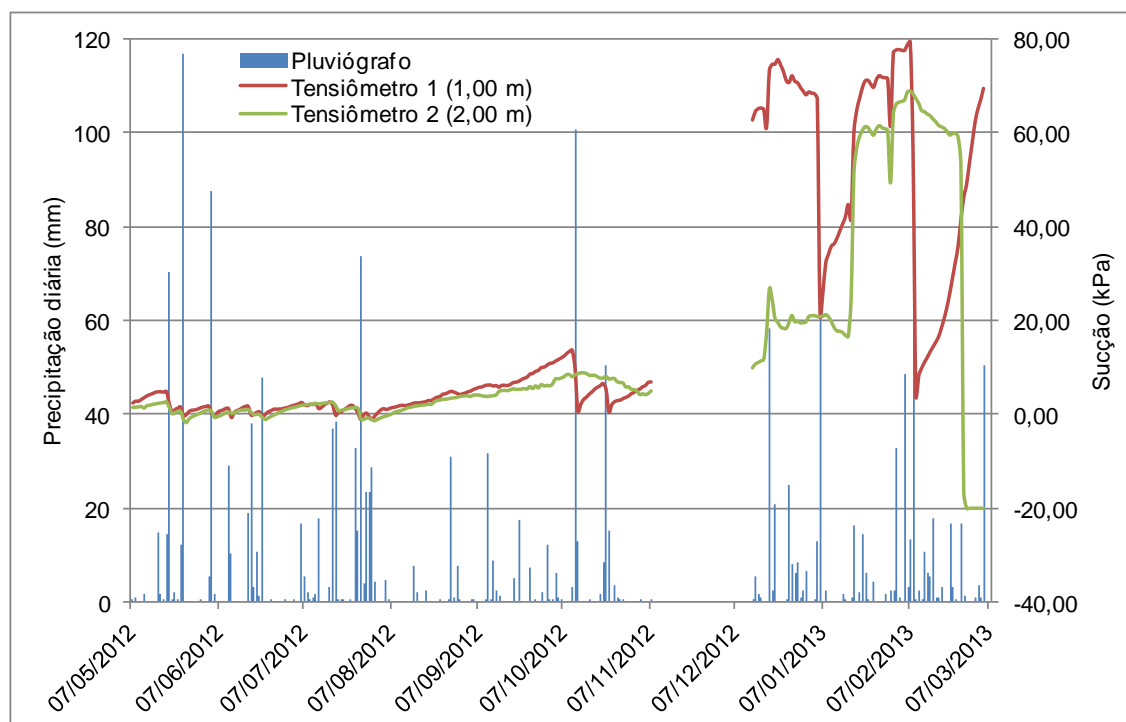


Figura 58 - Diagrama de frequências para os tensiômetros colocados na ilha inferior e leituras de precipitação acumulada diária

Depois da pausa no monitoramento, ocorrida entre o dia 07 de novembro e 13 de dezembro de 2012, os tensiômetros apresentam leituras de maior magnitude. Isto pode ter sido consequência da pouca precipitação ocorrida no local entre os meses de novembro e dezembro de 2012. O tensiômetro mais susceptível nesta ilha é o tensiômetro 1 devido à profundidade de instalação (1,00 m) a qual permite uma maior influência dos eventos pluviométricos e da vegetação.

Para os últimos meses de monitoramento correspondentes a esta pesquisa, observa-se que o tensiômetro 1 apresenta quedas abruptas como consequência das precipitações nos dias 06 de janeiro e 8 de fevereiro de 2013, apresentando processos de recuperação do valor de sucção relativamente rápidos. No caso do tensiômetro 2, estes eventos pluviométricos apresentam-se com diferença nas respostas, provavelmente em função da profundidade de instalação. Notou-se que após a precipitação de 8 de fevereiro de 2013 e as subseqüentes de baixa intensidade, este instrumento começa a diminuir o valor da leitura, tendo uma queda abrupta a partir do dia 24 de fevereiro, chegando no dia 27 de fevereiro a -20,17 kPa.

Na ilha intermediária, verificou-se que os instrumentos mais superficiais (tensiômetro 3 e tensiômetro 5) apresentaram maiores valores de sucção que aqueles colocados a maior profundidade (Figura 59).

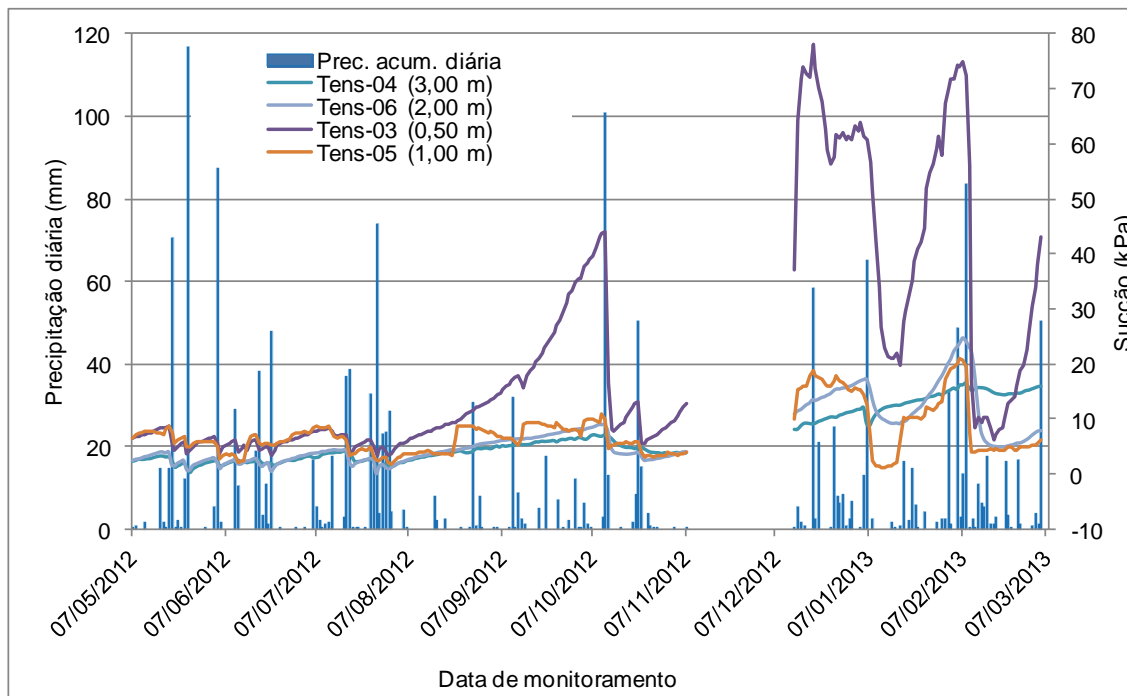


Figura 59 - Diagrama de frequências para os tensiômetros colocados na ilha intermediária e leituras de precipitação acumulada diária

Similar ao tensiômetro 1 colocado na ilha inferior, o tensiômetro 3 apresenta quedas abruptas nas leituras após eventos de grande magnitude, com recuperações rápidas dos valores de sucção. Isto pode ser consequência da permeabilidade do solo caracterizado por ser arenoso e a influência da vegetação.

Na parte superior do sistema de contenção pode observar-se que os tensiômetros 7 e 8 mantêm tendência similar, com variações muito pequenas nas ocorrências de eventos pluviométricos, podendo ser inferido que nesta localização não se tem muita influência das precipitações e a taxa de infiltração é baixa (Figura 60) mas se mantém o nível de umidade que leva a estabilizar os valores de sucção abaixo dos 10 kPa.

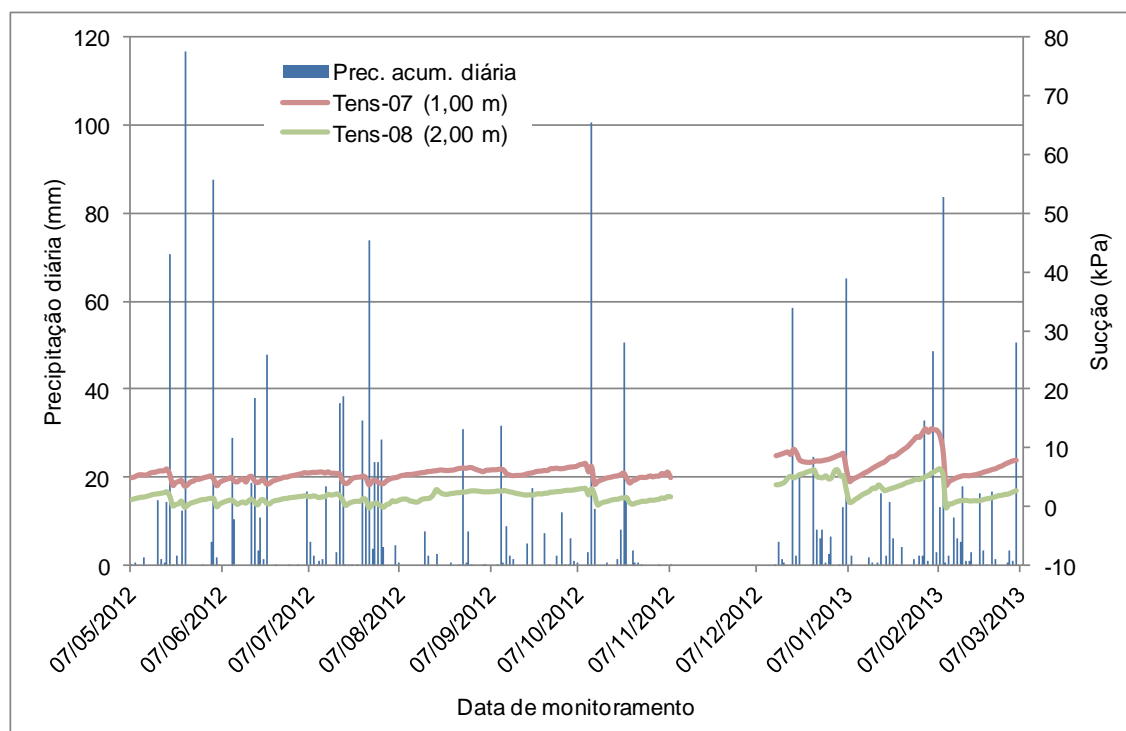


Figura 60 - Diagrama de frequências para os tensiômetros colocados na ilha superior e leituras de precipitação acumulada diária

Analisando-se os tensiômetros em profundidade, tem-se que o tensiômetro 3 é o instrumento mais superficial, instalado a 0,50 m. Este instrumento apresenta uma das maiores variações quanto a aumentos e diminuições das leituras ao longo do monitoramento (Figura 61). A forte presença de vegetação ao redor e a pouca profundidade de instalação podem ser as causas principais dos aumentos mais significativos nos valores de sucção para este instrumento (Figura 62).

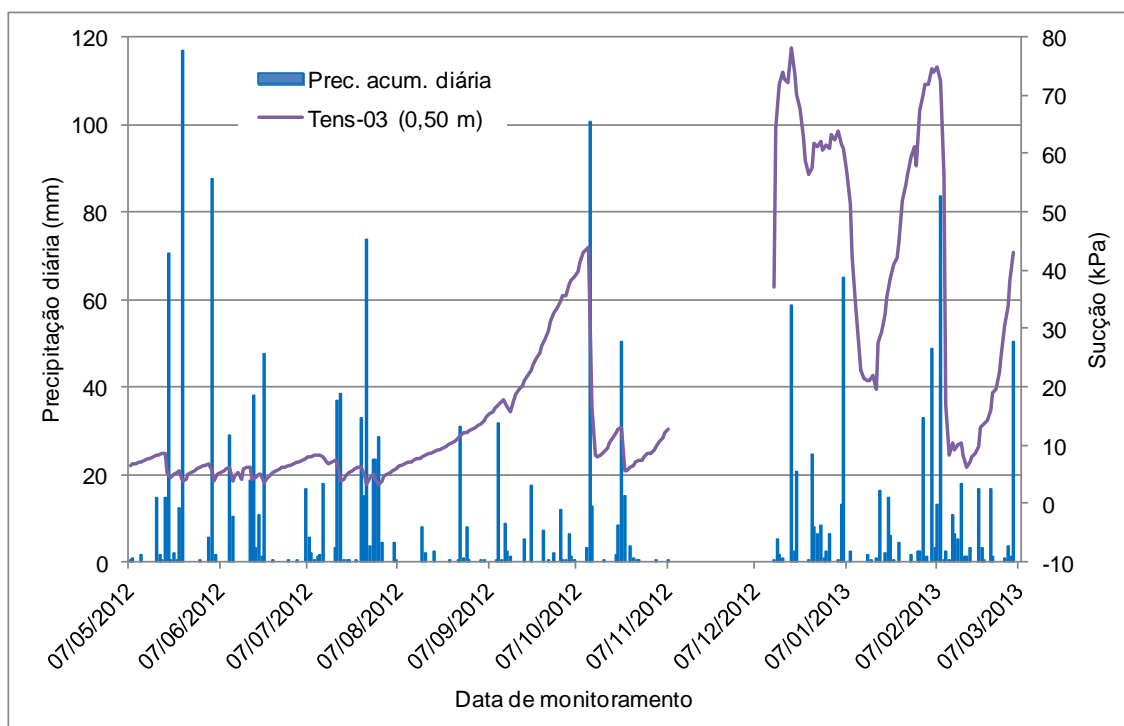


Figura 61 - Diagrama de frequência para as leituras correspondentes ao tensiômetro 3 e precipitações acumuladas diárias



Figura 62 - Imagem da vegetação ao redor dos instrumentos colocados na ilha intermediária do sistema de contenção. Na esquerda a imagem antes de ser feita a manutenção e na direita a imagem depois da manutenção na visita a campo para coleta de dados

Os instrumentos colocados a um metro de profundidade correspondem aos tensiômetros 1, 5 e 7, já mencionados. Estes instrumentos encontram-se distribuídos em cada ilha. Apresentam uma frequência de oscilação com poucas variações, excetuando-se o tensiômetro 1, que apresenta um aumento significativo a partir do mês de dezembro (Figura 63).

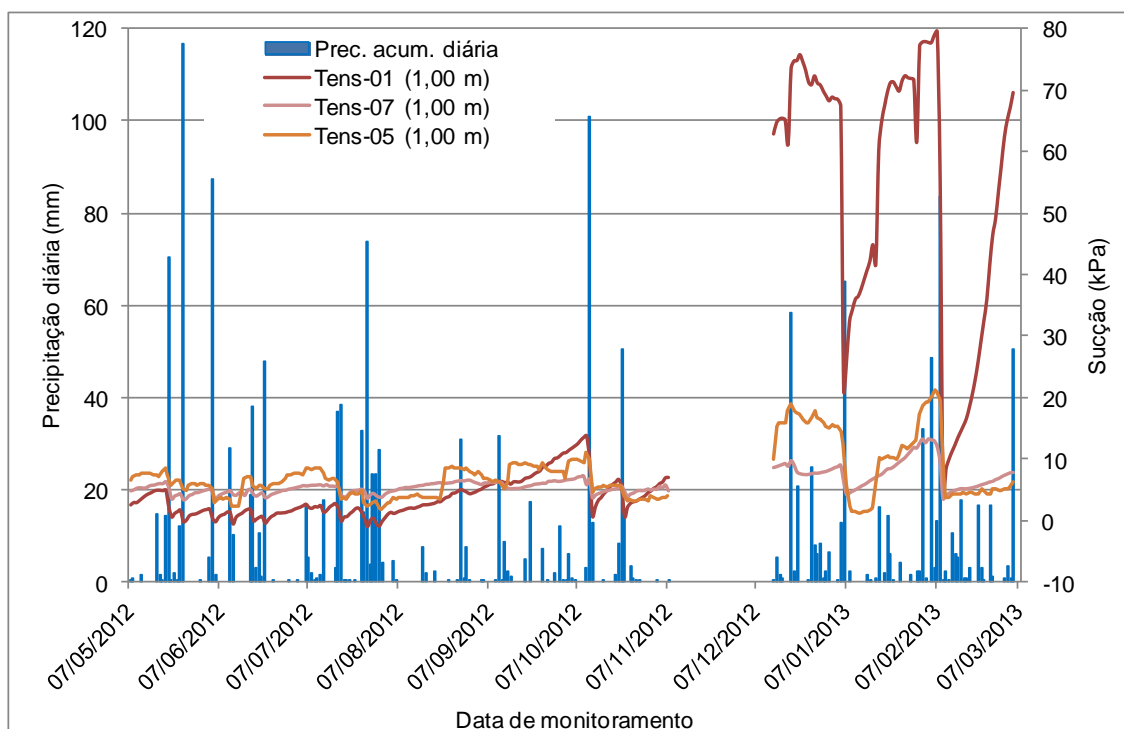


Figura 63 - Diagrama de frequências para tensiômetros instalados a 1,00 m de profundidade e precipitações acumuladas diárias

Nos tensiômetros instalados a 2,00 m de profundidade pode observar-se que as leituras se mantêm durante os primeiros seis meses de monitoramento com valores de até 10 kPa, e mostrando uma tendência ao aumento ao longo do tempo de monitoramento (Figura 64). Quanto ao tensiômetro 2, deve ser considerada a queda abrupta nas leituras a partir do dia 27 de fevereiro de 2013 e acompanhar coletas posteriores para se confirmar o correto funcionamento do instrumento.

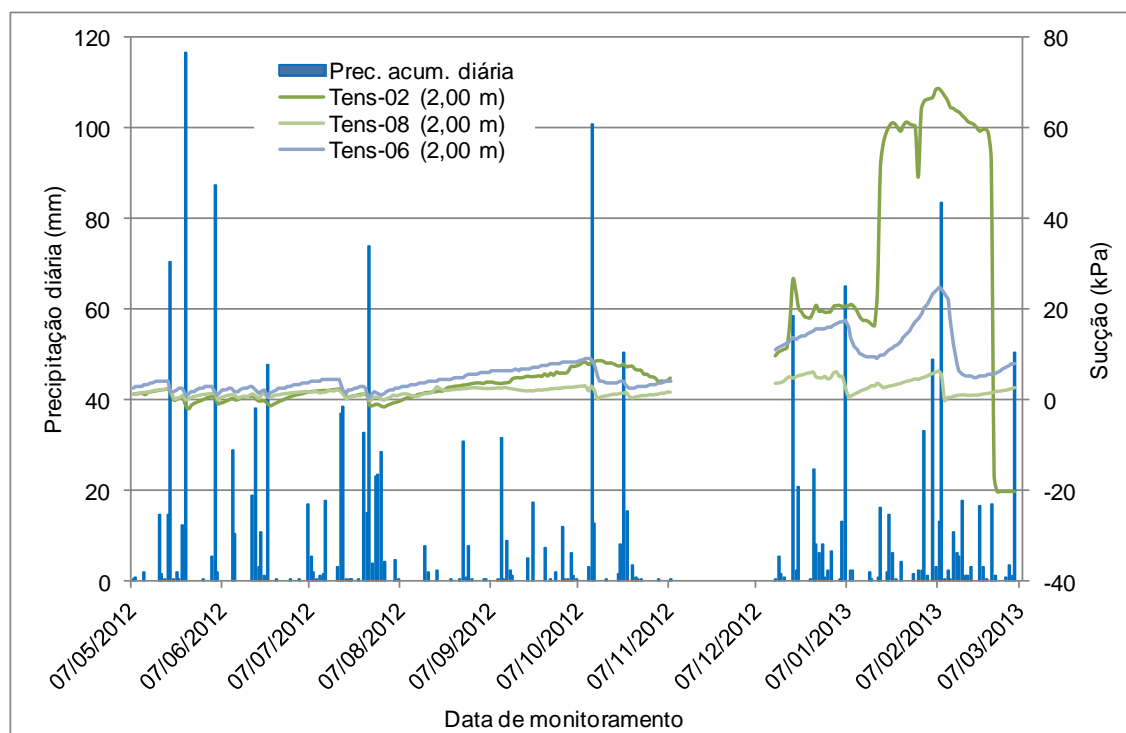


Figura 64 - Diagrama de frequência para os tensiômetros instalados a 2,00 m de profundidade e precipitação acumulada diária

Para o tensiômetro 4 pode ser observado que, devido a este estar na maior profundidade em relação aos outros instrumentos, apresenta estabilidade e poucas variações das leituras como consequência das precipitações. Similar aos demais tensiômetros, apresenta a partir do segundo trimestre a tendência ao aumento nos valores obtidos através do monitoramento, com diminuição gradual e pouco significativa em relação a precipitações de grande magnitude, como as acumuladas até o dia 11 de outubro de 2012. Pode se observar que apresenta uma queda no dia 5 de janeiro de 2013, possivelmente como consequência do acúmulo de eventos de dias anteriores (Figura 65).

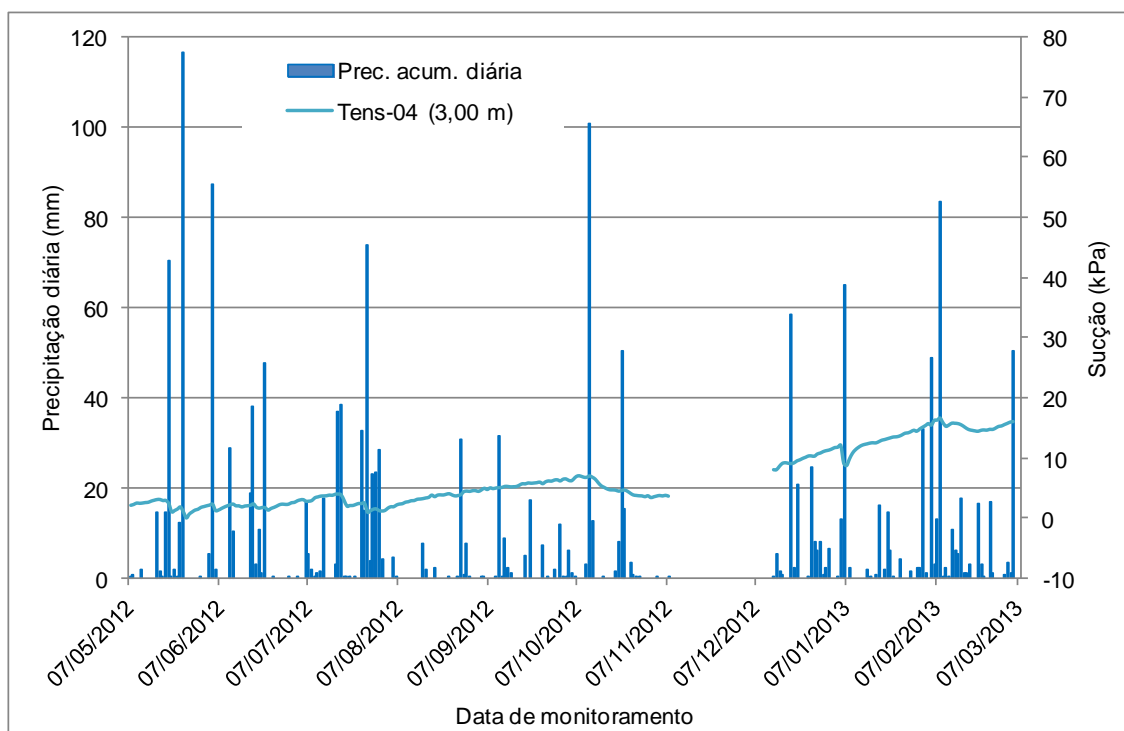


Figura 65 - Diagrama de frequência para o tensiômetro TENS-04 instalado a 3,00 m de profundidade e precipitação acumulada diária

O comportamento dos tensiômetros em geral indica que a sucção no solo diminui com a profundidade e os tempos de resposta entre a precipitação e as leituras ocorre no mesmo dia, ao contrário dos piezômetros que para ser observada uma resposta tem-se atraso de vários dias.

5.2.3 Inclínômetros

O instrumento para as medições de deslocamentos horizontais, denominado como inclinômetro 1 (INCL-01), localizado na parte média do sistema de contenção, apresenta valores de leituras estáveis, variando ± 1 mm entre base e topo. Podem observar-se dois pontos onde o inclinômetro apresenta ligeiras variações de leituras ao longo da profundidade. Estes pontos encontram-se localizados a 5,00 m e 2,5 m de profundidade, porém, o resultado do seu deslocamento acumulado varia ± 1 mm, o que é pouco significativo.

A Figura 66 apresenta as leituras realizadas e as datas assim como o deslocamento acumulado nos eixos A e B do inclinômetro 1.

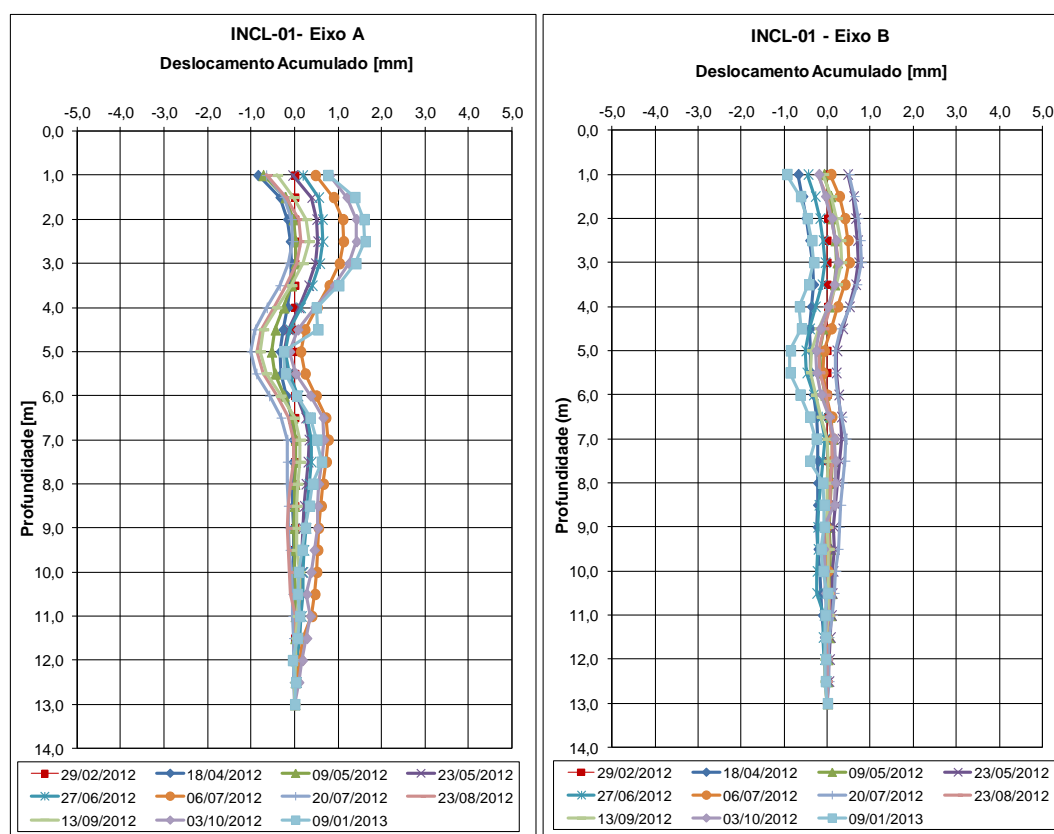


Figura 66 - Gráficos das leituras dos eixos A e B para o inclinômetro 1 e seus deslocamentos acumulados

O inclinômetro 2 (INCL-02) localizado na parte superior do sistema de contenção, também apresenta estabilidade nas leituras. Pode observar-se uma variação de ± 2 mm respeito à leitura zero no topo do tubo e um comportamento linear, à diferença do inclinômetro 1.

A Figura 67 apresenta o comportamento do inclinômetro 2, com os deslocamentos acumulados nos eixos A e B ao longo do período de monitoramento.

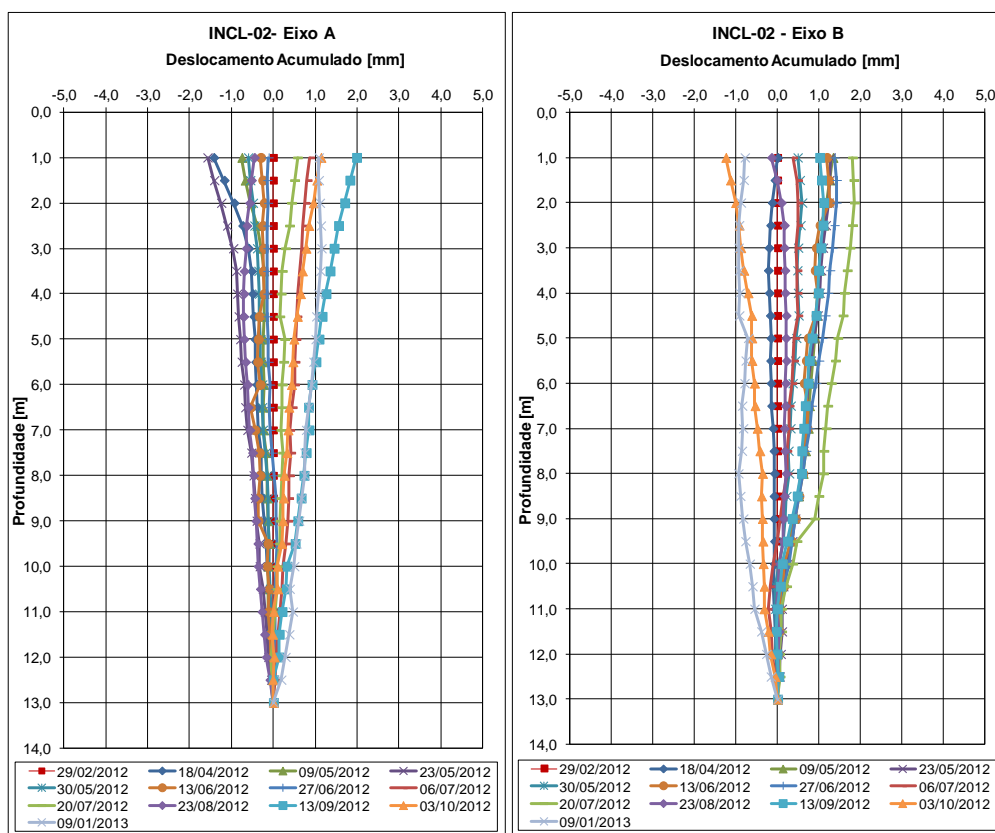


Figura 67 - Gráficos das leituras dos eixos A e B para o inclinômetro 2 e seus deslocamentos acumulados

5.3 Análise das séries de leituras de instrumentos instalados para monitoramento do sistema de contenção.

Apresentam-se a seguir as séries de leituras correspondentes aos instrumentos instalados para o monitoramento do comportamento do sistema de contenção.

5.3.1 Células de Carga

Quanto às células de carga, as leituras apresentam uma tendência semelhante, diferenciadas entre elas pela carga inicial aplicada no grampo no momento da instalação, e todas apresentando tendência à relaxação da carga.

Isto permite observar que ao longo do tempo de monitoramento os grampos têm alcançado um nível de estabilização quanto ao carregamento aplicado, o qual indica que nesses pontos o sistema não tem experimentado solicitações de carga por ação da massa estabilizada (Figura 68).

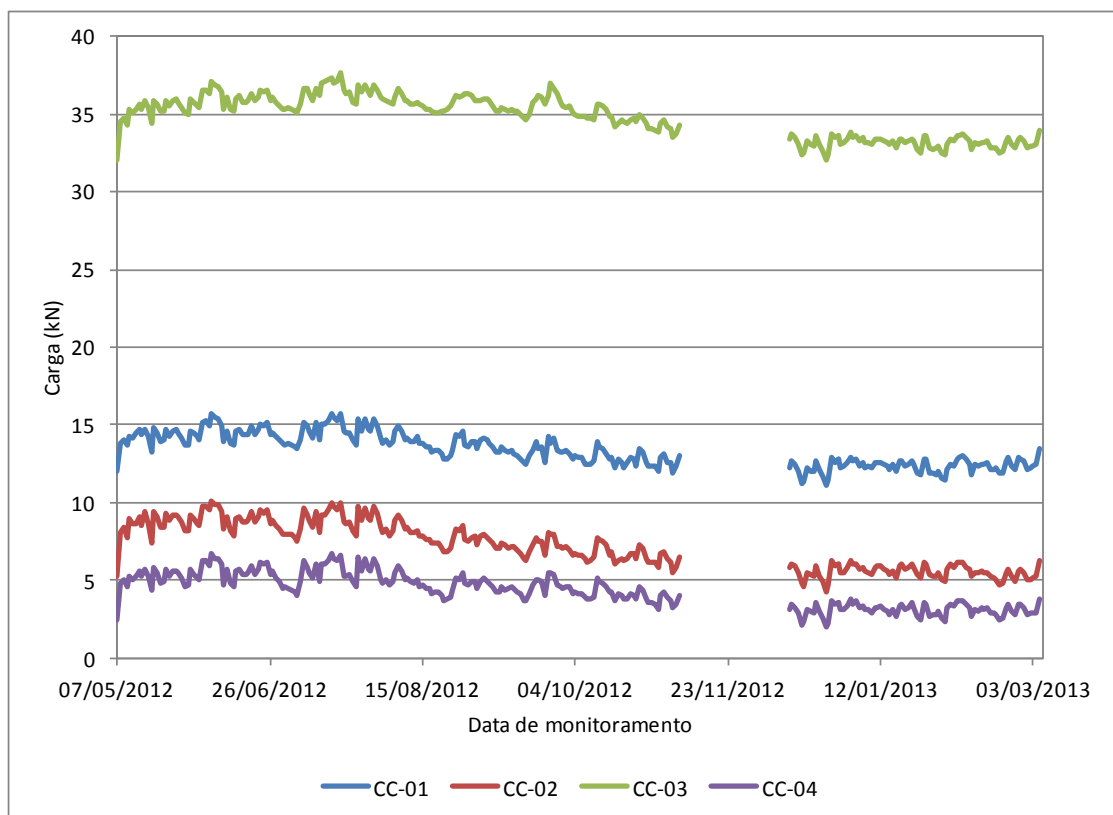


Figura 68 - Diagrama de frequência para as células de carga

Analisando-se as leituras pode-se observar que a série temporal, além de apresentar tendência ao decréscimo da carga aplicada ao grampo, também apresenta estabilidade nas leituras. No intuito de estabelecer as correlações entre as leituras das células de carga, foram calculados os coeficientes de correlação e apresentados na Tabela 26, onde se observa que os valores de correlação entre estas é muito forte, com valores acima de 0,9. Adicionalmente, foi calculada a correlação com os eventos pluviométricos, observando-se que estatisticamente a relação deste par de variáveis é baixa, com valores entre 0,08 e 0,15.

Tabela 26 - Matriz de coeficientes de correlação para as leituras das células de carga

	Pluviógrafo	CC-01	CC-02	CC-03	CC-04
Pluviógrafo	1	0,15	0,13	0,08	0,15
CC-01	0,15	1	0,98	0,92	0,98
CC-02	0,13	0,98	1	0,93	0,98
CC-03	0,08	0,92	0,93	1	0,96
CC-04	0,15	0,98	0,98	0,96	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

Confrontando as séries de leituras das células de carga com as ocorrências de precipitações pode se observar que estas apresentam resposta aparente durante e após o evento pluviométrico, tal como pode ser observado na Figura 69.

Durante o evento pluviométrico pode se verificar que os valores de leituras tendem a aumentar em pouca magnitude para logo diminuir gradualmente.

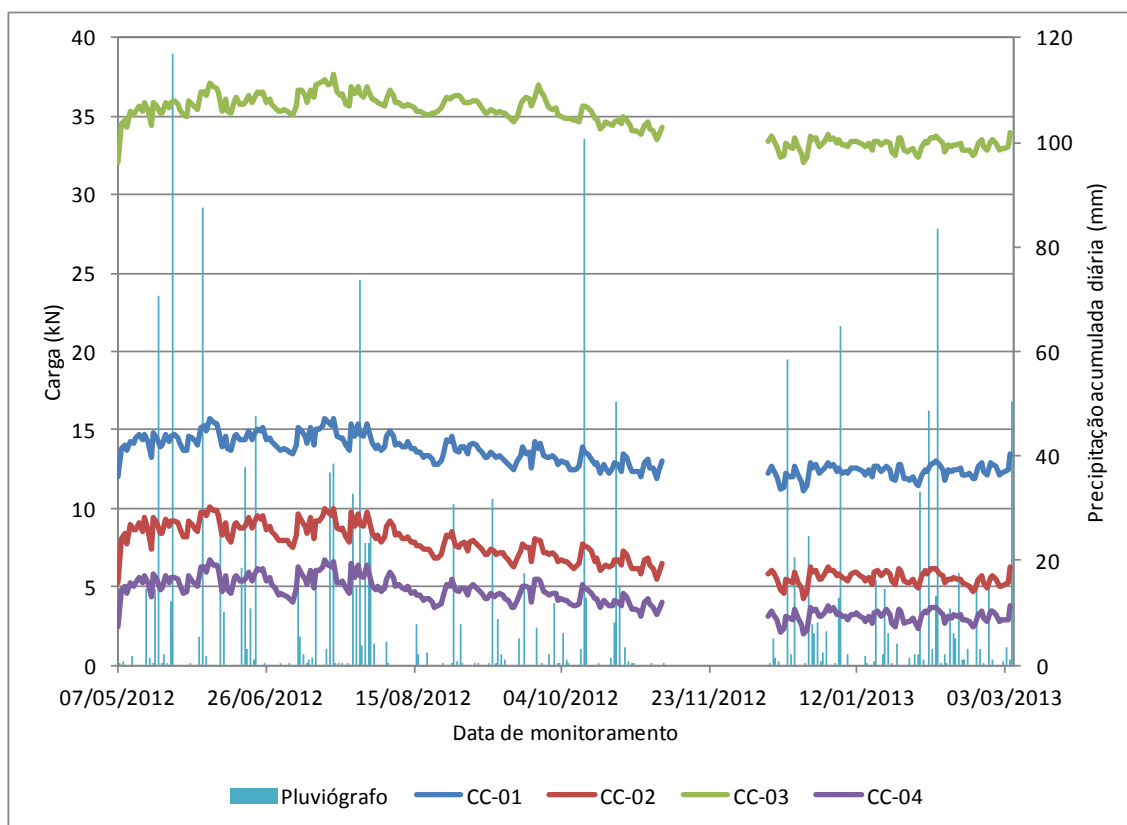


Figura 69 - Diagramas de frequência para as células de carga e precipitação diária acumulada

5.3.2 *Strain gauges*

As leituras dos *strain gauges* instalados no sistema de contenção foram agrupados respeito às barras instrumentadas com o fim de otimizar a análise dos resultados obtidos.

Quanto à análise que será realizada a seguir foram utilizadas as séries de dados correspondentes aos sensores instalados a 2,50 m da ponta, no extremo mais superficial das barras. Estes resultados são apresentados e descritos por barra instrumentada.

A Barra 01 instrumentada com o sensor SG-08 apresenta tendência ao aumento dos valores de leituras ao longo do período de monitoramento. Este resultado é interpretado como o incremento da tração nesta seção do grampo.

A Figura 70 apresenta o desenvolvimento da série de leituras para este sensor onde se observa o aumento contínuo do esforço registrado começando aproximadamente no quinto mês de leituras. A diferença entre a leitura final e a leitura inicial registrada é de aproximadamente 0,97 kN no período monitorado.

Quando comparadas com as precipitações, têm-se que as leituras do sensor da Barra 1 não apresenta uma possível influência do aumento do carregamento respeito as chuvas. Isto pode ser observado na Figura 71.

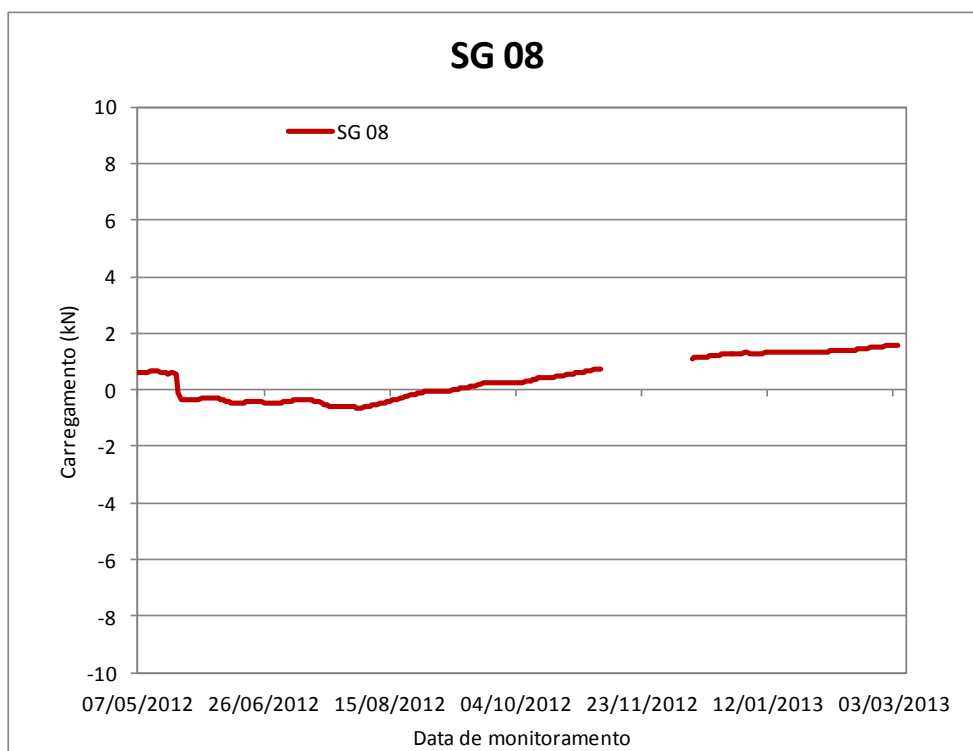


Figura 70 - Diagrama de frequência para o strain gauge SG-08 correspondente à Barra 01

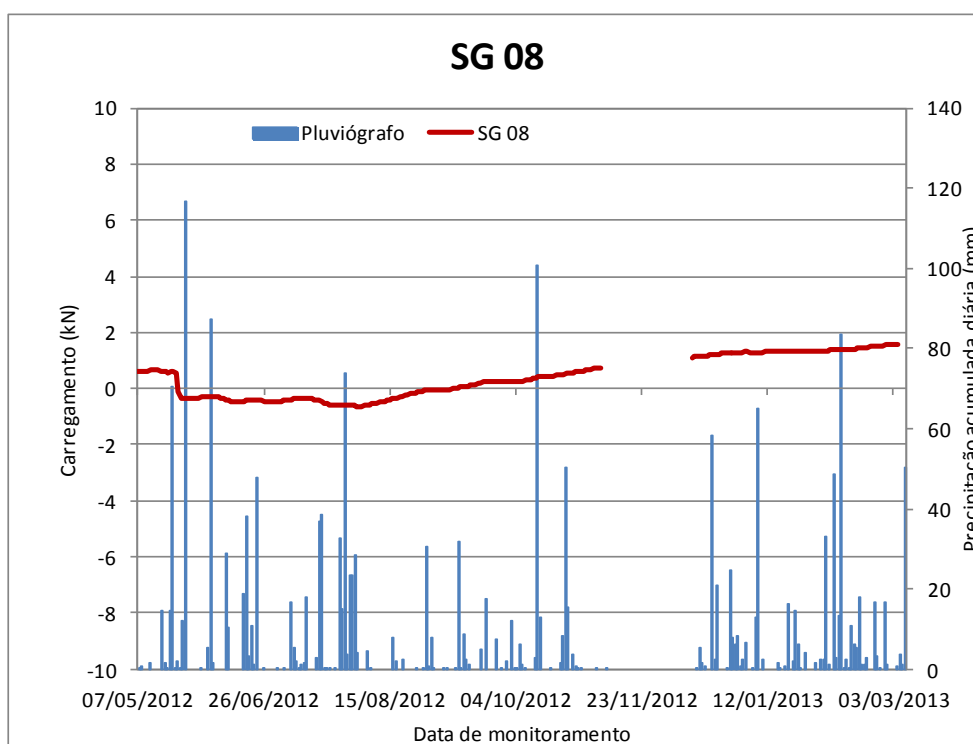


Figura 71 - Diagrama de frequência das leituras do strain gauge SG-08 e eventos pluviométricos

A Barra 2 instrumentada com o sensor SG-12 apresenta tendência à diminuição durante os três primeiros meses de leituras para logo experimentar aumento contínuo destas, até alcançar aproximadamente o valor de leitura inicial (Figura 72).

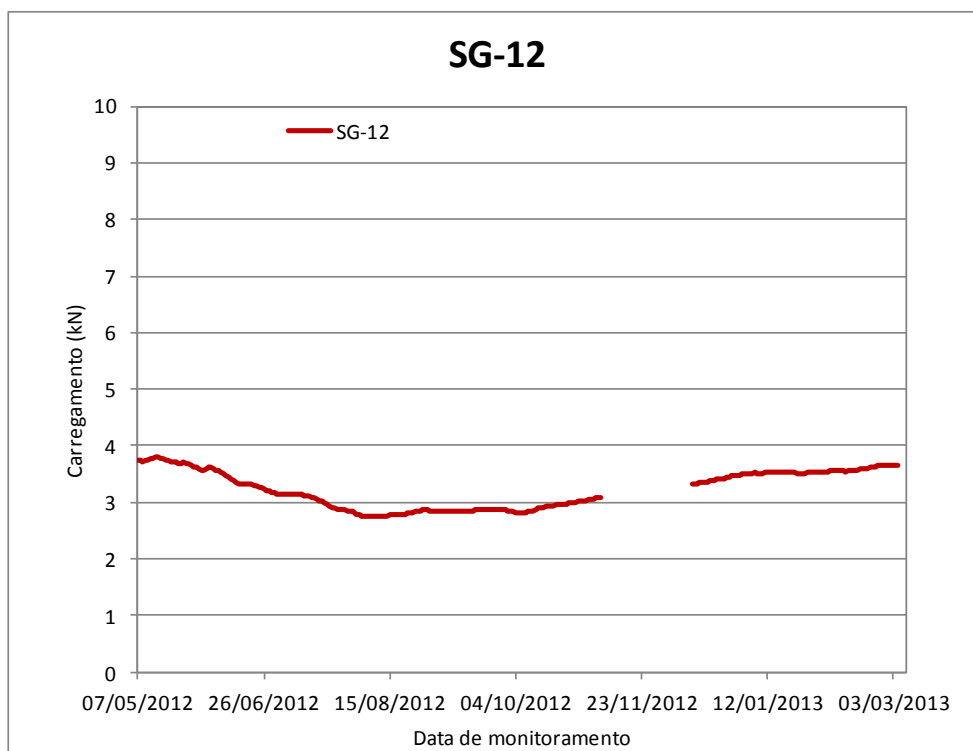


Figura 72 - Diagrama de frequência para o strain gauge SG-12 correspondente à Barra 02

Considerando as leituras do sensor e os eventos pluviométricos, verifica-se que para este não é possível relacionar os eventos com as variações nas leituras visto que não podem ser observadas variações nas datas de ocorrências de chuvas. Cabe salientar que esta análise é feita através da observação de variações e através da correlação direta entre os eventos e as leituras (Figura 73).

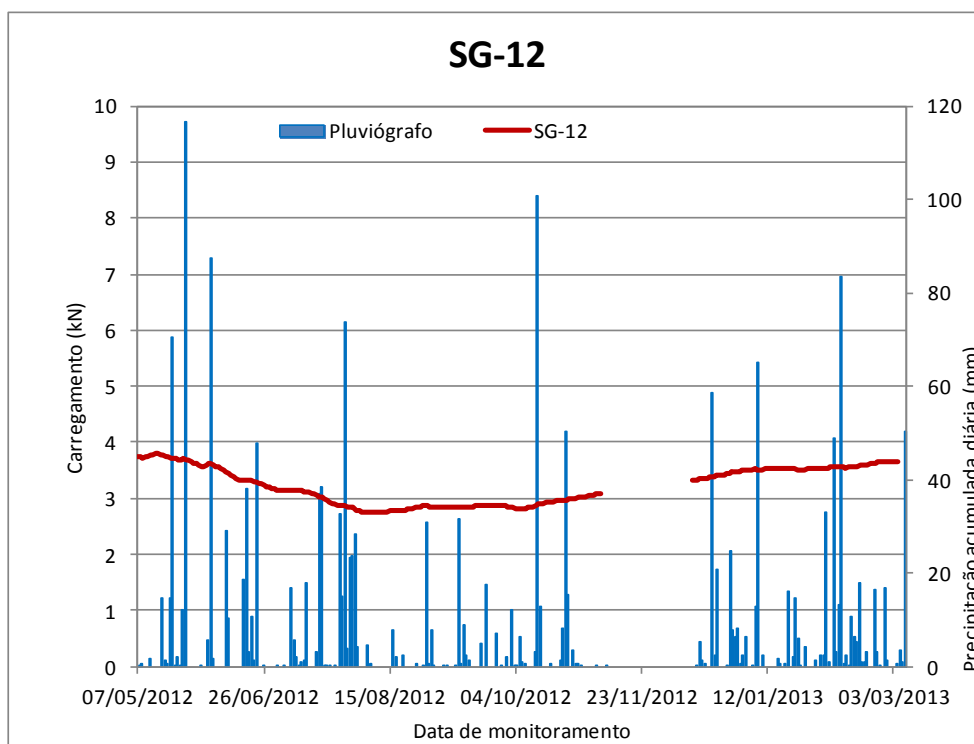


Figura 73 - Diagrama de frequência das leituras do strain gauge SG-12 e eventos pluviométricos

A Barra 03 instrumentada com o sensor SG-16 apresenta um comportamento com poucas variações, podendo ser considerada a estabilidade nas leituras deste sensor. (Figura 74).

Em relação às precipitações, a Figura 75 mostra que estas variações não aparentar ter influência dos eventos pluviométricos, visto que ao longo do período monitorado as variações permanecem estáveis.

Este sensor apresenta períodos de diminuição e aumentos nas leituras, com a característica de serem valores negativos. Neste caso deve analisar-se as leituras por um período maior, com a finalidade de observar se existem aumento nos valores de leituras.

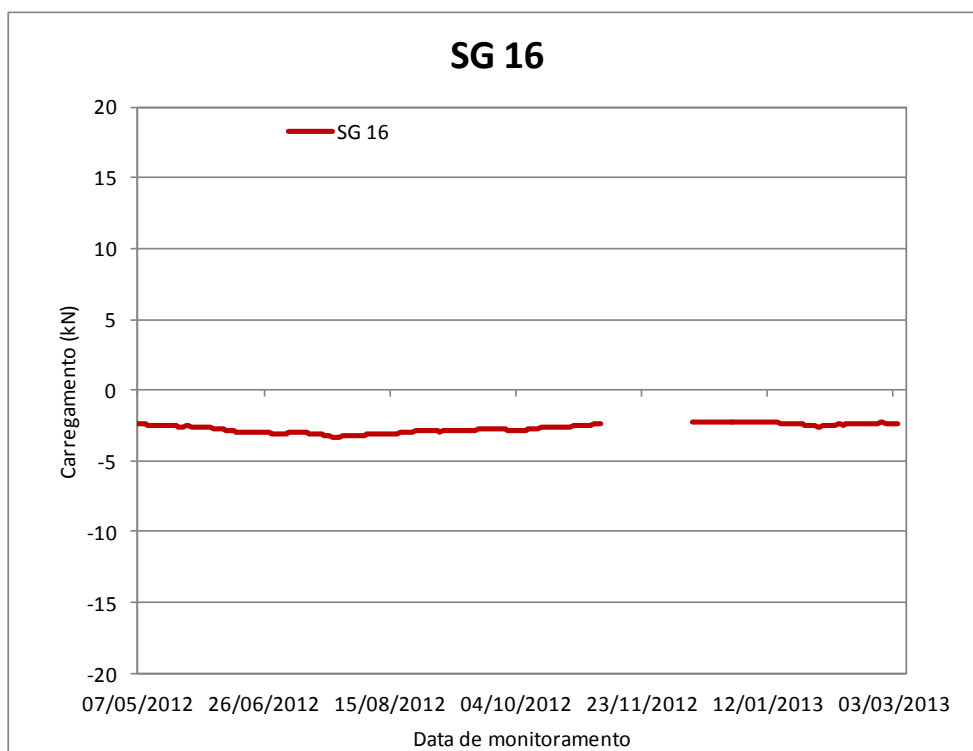


Figura 74 - Diagrama de frequência para o strain gauge SG-16 correspondente à Barra 03

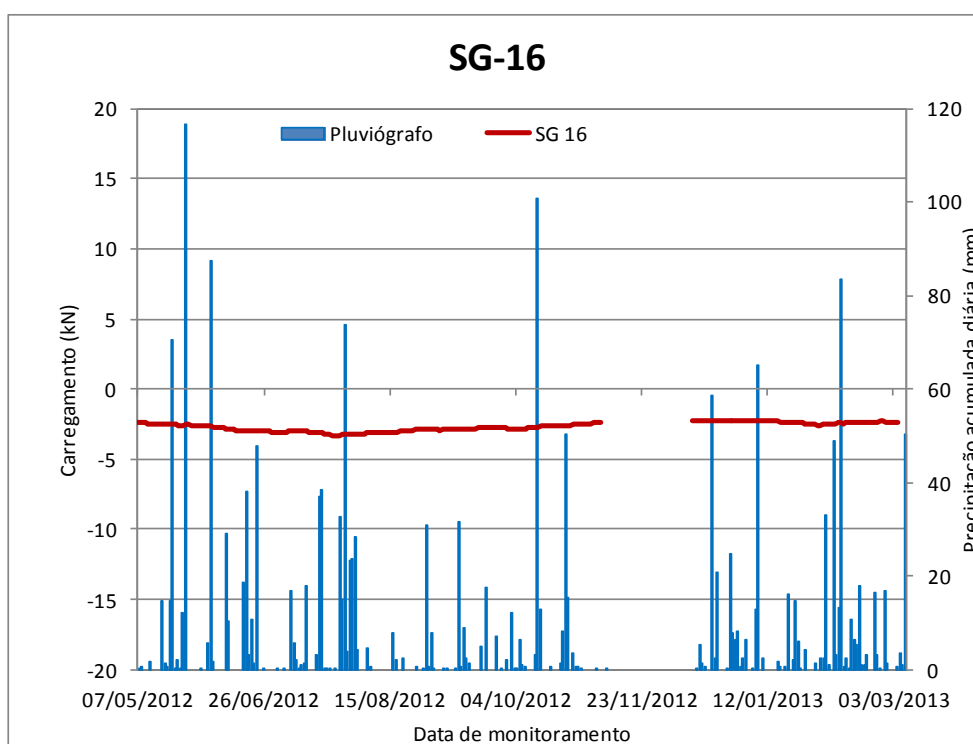


Figura 75 - Diagrama de frequência das leituras do strain gauge SG-16 e eventos pluviométricos

A Barra 04 instrumentada com o sensor SG-04 apresenta um comportamento estável, com um aumento abrupto nos valores de leituras registrado durante o primeiro mês de leituras, para logo manter-se com tendência estacionária entorno aos -2,60 kN (Figura 76).

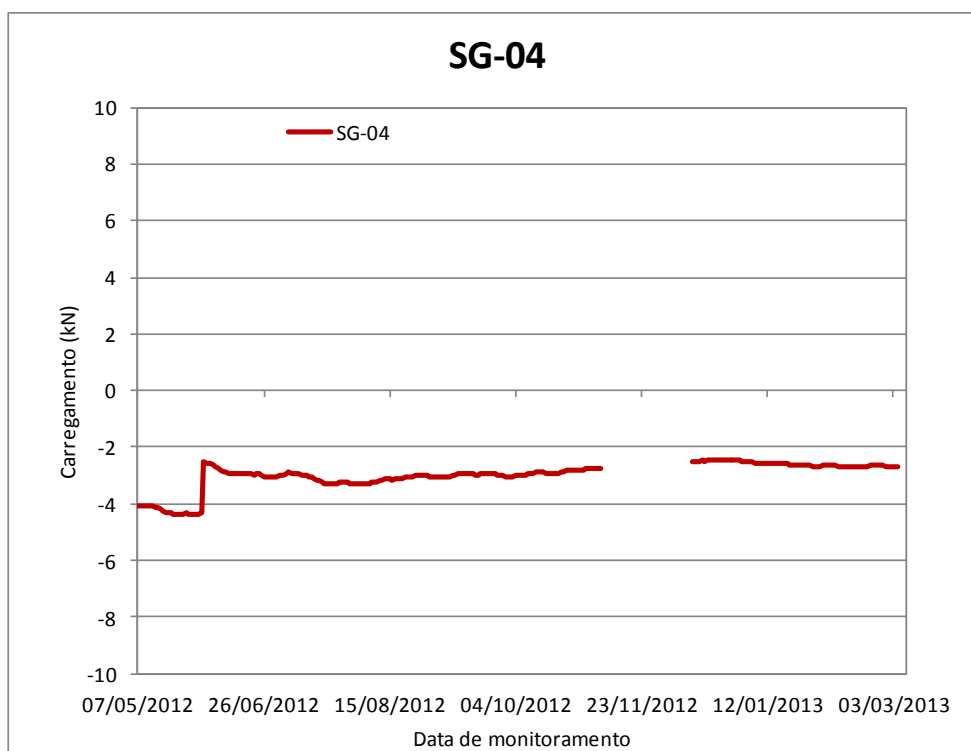


Figura 76 - Diagrama de frequência para o strain gauges SG-04 correspondente à Barra 04

Similar ao sensor SG-16, as leituras do sensor SG-04 apresentam-se negativas. A observação destas leituras por um período de tempo maior é recomendada para tentar explicar o que poderia estar acontecendo nestes dois sensores.

Com respeito às variações a Figura 77 mostra que as precipitações pluviométricas aparentam não ter influência.

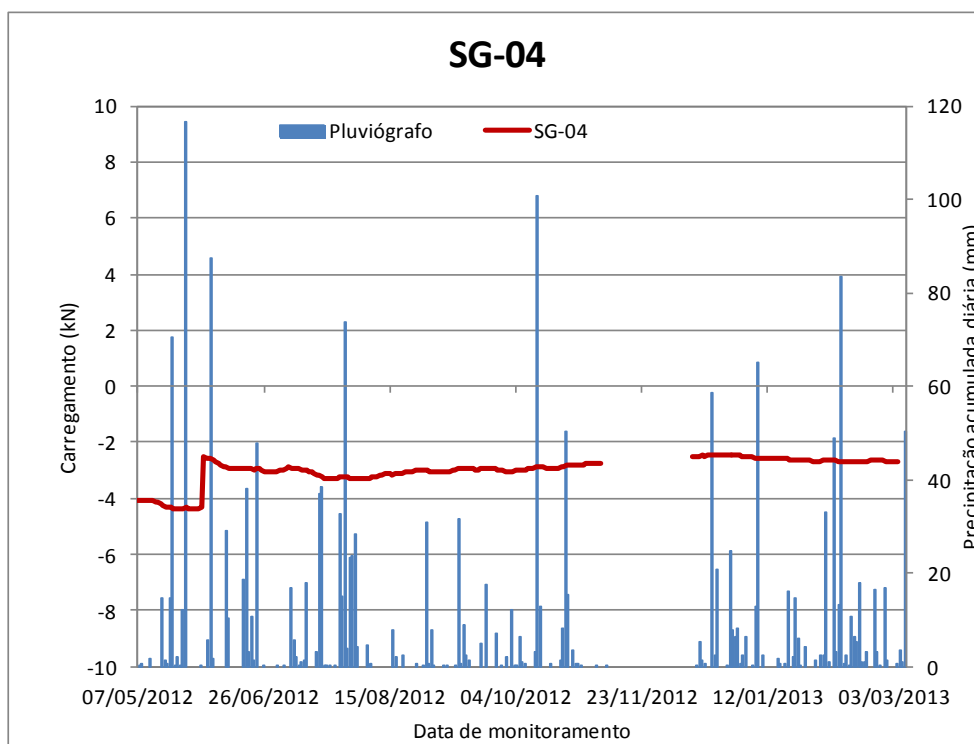


Figura 77 - Diagrama de frequência das leituras dos strain gauges SG-04 e eventos pluviométricos

Quanto à correlação entre as leituras destes sensores, a Tabela 27 apresenta os coeficientes de correlação obtidos para cada barra, onde pode observar-se que a menor correlação durante o período de monitoramento é apresentado entre a Barra 02 e a Barra 04 com o valor de -0,075 e a correlação mais alta é apresentada entre a Barra 01 e a Barra 03 a qual apresenta um coeficiente de 0,900. Quanto as correlações entre as precipitações e as leituras obtidas das barras monitoradas, pode observar-se que os coeficientes são muito baixos, considerando a ausência de correlação entre estas variáveis.

Tabela 27 - Matriz de coeficientes de correlação entre as leituras do pluviógrafo e as leituras dos strain gauges das barras instrumentadas

	Pluviógrafo	Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04
Pluviógrafo	1	-0,009	0,090	-0,004	-0,038
Barra 01	-0,009	1	0,570	0,900	0,458
Barra 02	0,090	0,570	1	0,709	-0,075
Barra 03	-0,004	0,900	0,709	1	0,281
Barra 04	-0,038	0,458	-0,075	0,281	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

Quando comparadas com as variações das células de carga, pode se observar que os *strain gauges* apresentam comportamentos que sugerem estabilidade nas leituras, o que indica a estabilidade no sistema de contenção da encosta. Nas análises de correlações cruzadas entre os instrumentos, estes sensores apresentam correlações que alcançam valores médios ao longo do período monitorado (Anexo 1).

5.3.3 Crackmeters

A análise das séries de leituras dos *crackmeters* instalados na malha, também conhecidos como alongômetros, permitiu analisar o comportamento do sistema de contenção.

As deformações sofridas pela malha são medidas através das variações de leitura ao longo do tempo de monitoramento com respeito à leitura inicial do instrumento. As leituras positivas representam abertura ou esticamento do eixo do instrumento e, consequentemente para leituras negativas tem-se o fechamento ou compressão do eixo.

Como mencionado no capítulo 3, os *crackmeters* foram colocados em 4 ilhas distribuídas na região intermediária do sistema de contenção a fim de monitorar as variações e possíveis solicitações nesta área, em posições perpendiculares um a outro. Para o melhor entendimento, a colocação destes será descrito como vertical e horizontal com respeito ao plano representado pela superfície da malha.

Na primeira ilha composta pelo *crackmeter* 01 (CRA-01) pode-se observar que a série apresenta leituras com tendência a diminuição dos valores ao longo do tempo, com variações que alcançam os dois milímetros em magnitude. Visto que não representa uma mudança significativa das leituras iniciais, pode-se concluir que neste ponto o sistema encontra-se estável (Figura 78).

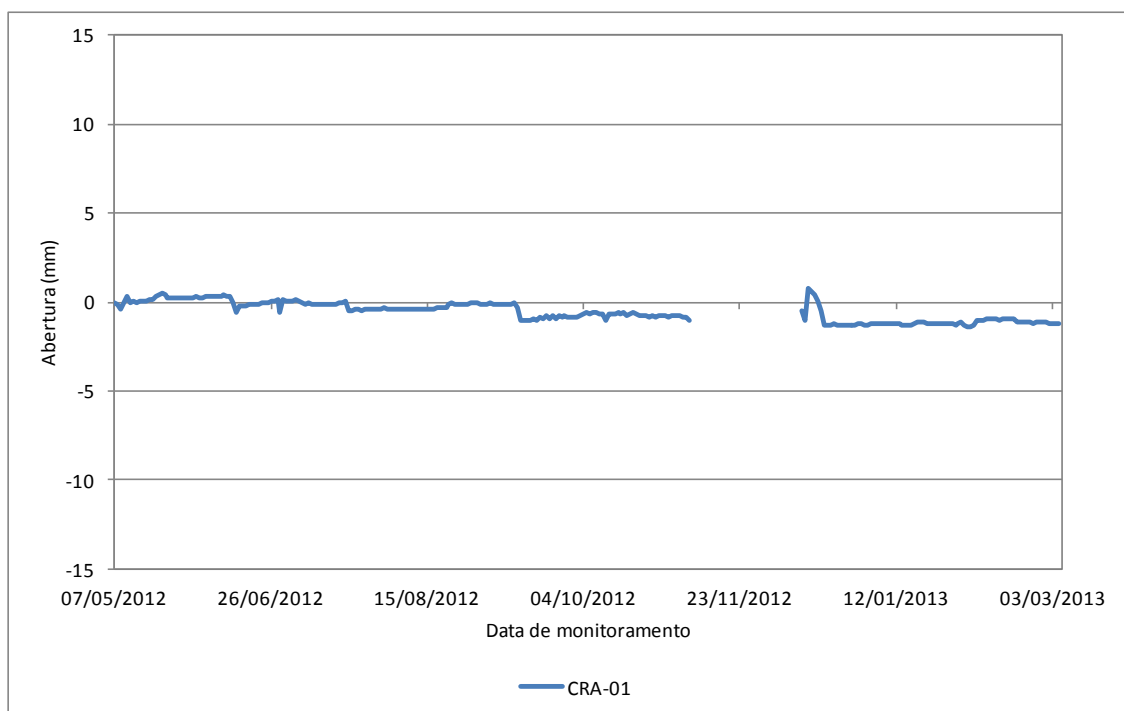


Figura 78 - Diagrama de frequência para as leituras do crack meter CRA-01

Quando comparado com as precipitações, pode-se observar que este instrumento não apresenta relação alguma com os eventos pluviométricos (Figura 79).

Pode-se observar nas leituras brutas (não processadas) do *crackmeter* 01 (CRA-01) que as visitas a campo para coleta de dados e manutenção dos tensiômetros afetam de maneira direta as leituras do instrumento. Como este se encontra localizado a pouca distância da ilha de tensiômetros, com o caminhar do pessoal da equipe de monitoramento se produz o esticamento da malha metálica e consequentemente a variação na leitura.

Com respeito à posição, este instrumento está instalado de maneira vertical. Possivelmente, a diminuição no comprimento do eixo é compatível com a diminuição do esforço na célula de carga que se encontra ao lado. Isto poderia ser consequência de uma relaxação de carga no grampo e da tensão na malha.

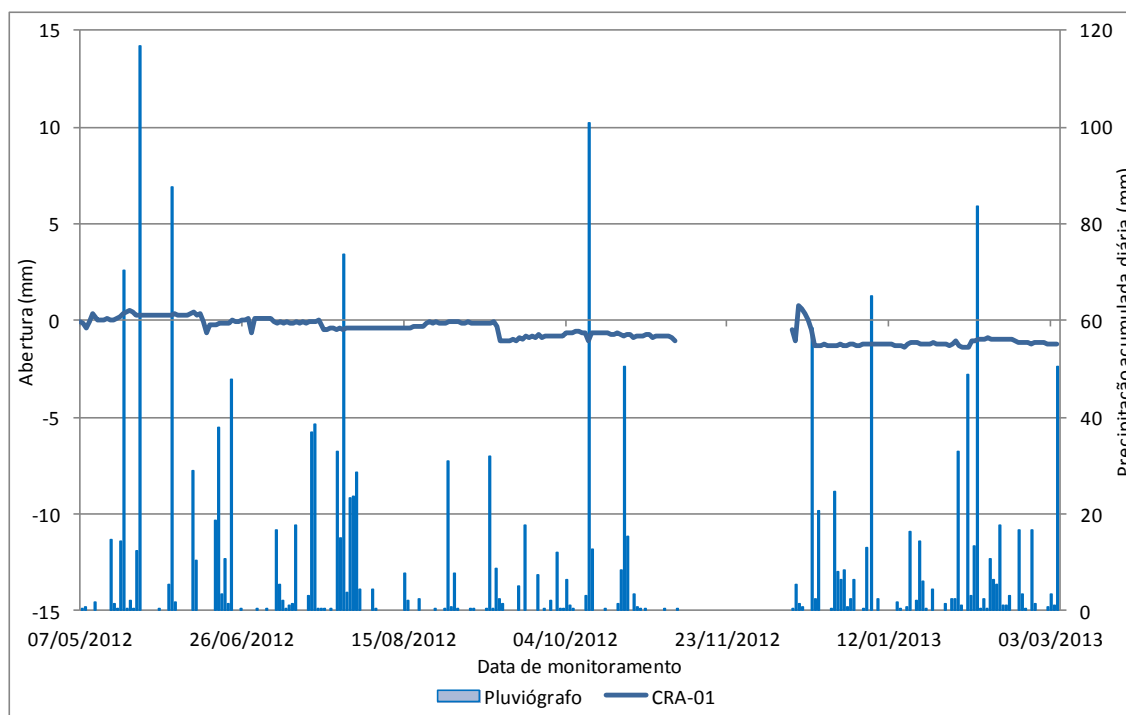


Figura 79 Diagrama de frequência para as leituras do crack meter CRA-01 e as leituras de precipitações acumuladas diárias.

Na ilha 2, os *crackmeters* apresentam um comportamento com tendência ao decréscimo nos valores das leituras, com exceção do CRA-08, o qual apresenta tendência ao aumento durante os primeiros seis meses de leitura até se estabilizar.

Na Figura 80 apresenta-se o diagrama de frequência para a ilha 2, onde podem ser observadas as tendências dos instrumentos e as oscilações ao longo do tempo de monitoramento.

Quanto à posição destes instrumentos, tem-se que aqueles colocados de maneira horizontal nesta ilha apresentam comportamentos opostos. O CRA-08 apresenta abertura do eixo e o CRA-07 compressão. Enquanto que em aqueles instalados verticalmente o comportamento é semelhante, com tendência à compressão do eixo.

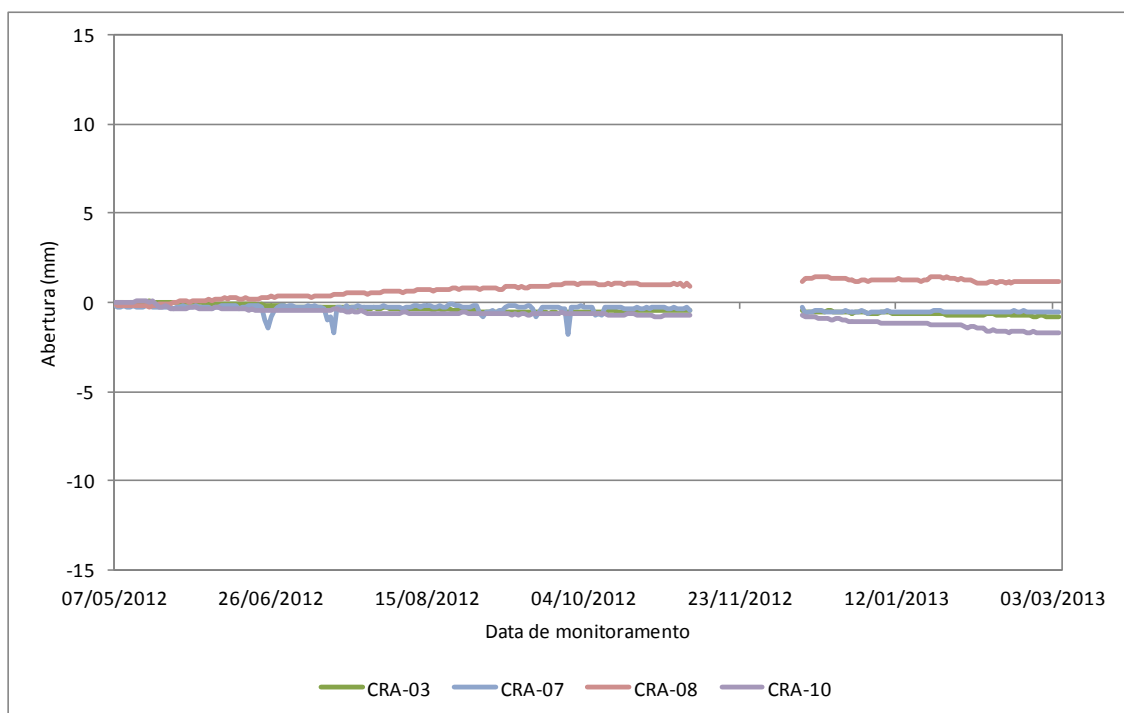


Figura 80 - Diagrama de frequência para a ilha 2 de crackmeters

Quanto à comparação entre as leituras dos instrumentos desta ilha e as precipitações, observa-se que parece não haver relação entre estas variáveis (Figura 81).

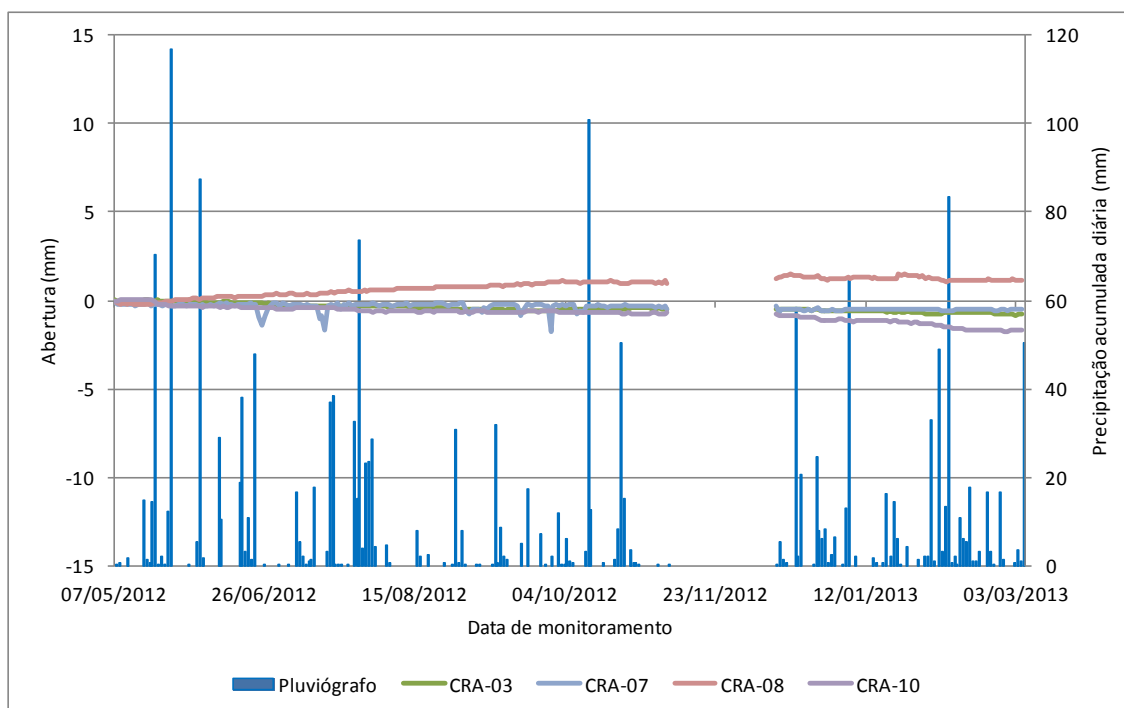


Figura 81 - Diagrama de frequência das leituras dos instrumentos colocados na ilha 2 de crackmeters e as leituras de precipitação acumulada diária

Na ilha 3, os *crackmeters* CRA-02 e CRA-11 apresentam uma tendência ao fechamento, com uma variação entre a leitura inicial e a leitura final de aproximadamente 12,20 mm e 8,07 mm, enquanto o CRA-04 apresenta tendência linear à abertura com variação final de 0,50 mm com respeito à leitura inicial (Figura 82).

Pode ser observado que o CRA-02 apresenta uma frequência de oscilação com muitas variações, as quais poderiam ser interpretadas como ruído, pois os demais instrumentos não apresentam comportamento similar.

Pode também ser observado que entre o CRA-02 e CRA-11 identificam-se variações similares depois do dia 13 de dezembro de 2012, apresentando tendência à diminuição.

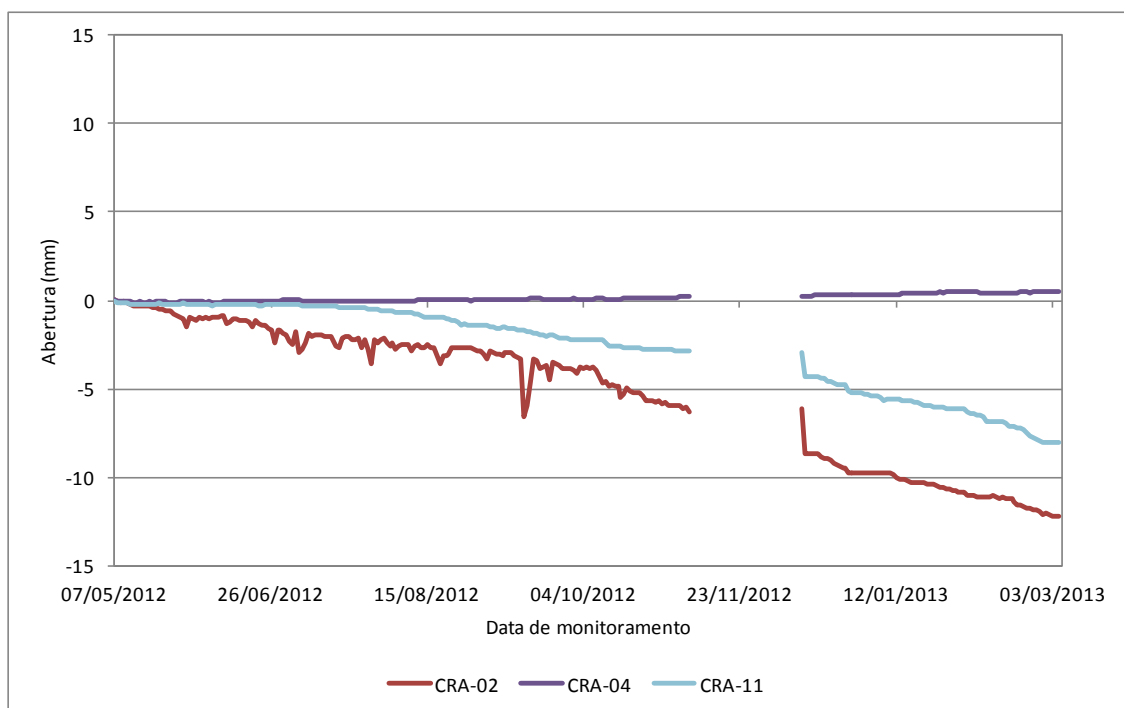


Figura 82 - Diagrama de frequências para as leituras correspondentes aos crackmeters colocados na ilha 3

Nesta ilha observa-se também que as precipitações não afetam de maneira alguma as leituras. Na Figura 83 são comparadas as séries de leituras dos *crackmeters* com a precipitação diária acumulada.

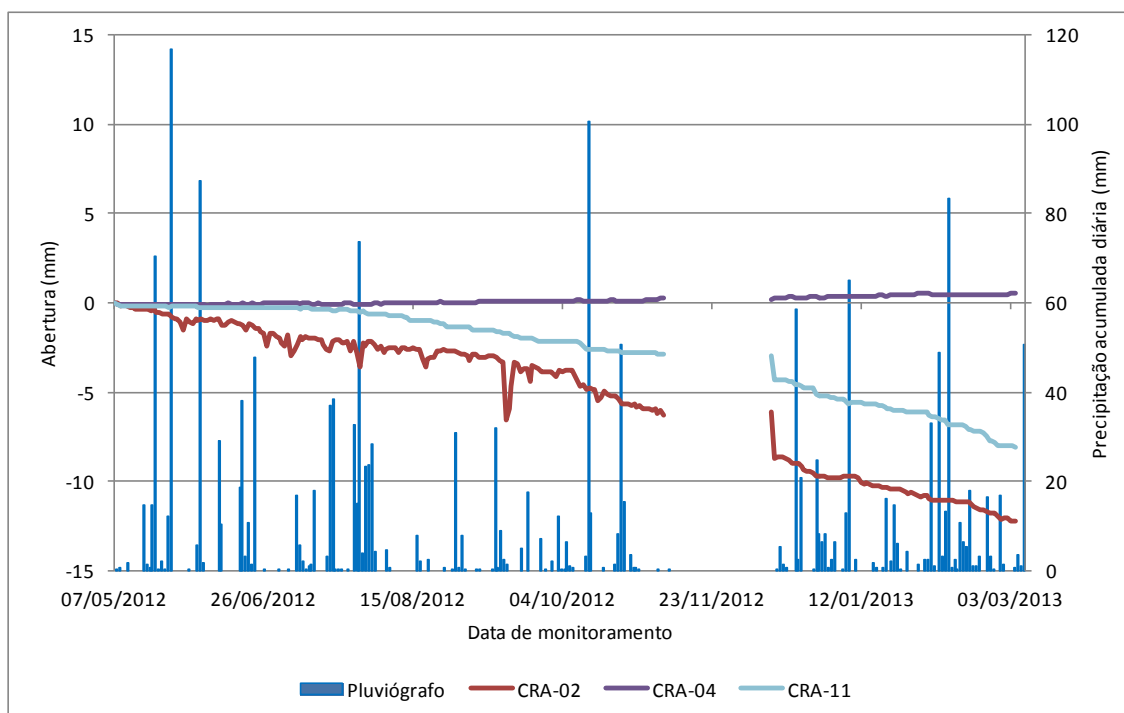


Figura 83 - Diagrama de frequências para as leituras correspondentes aos crackmeters colocados na ilha 3 e as precipitações acumuladas diárias

A ilha 4 de *crackmeters* apresenta uma tendência geral de fechamento em todos seus instrumentos com magnitudes diferentes. As variações estão entre os - 1,83 e -8,49 mm (Figura 84).

Com respeito à posição de colocação, os CRA-05, CRA-06 e CRA-12 instalados verticalmente na malha, apresentam compressão no eixo de modo semelhante ao instrumento colocado horizontalmente (CRA-09). Isto também pode ser explicado como consequência de possível amolgamento do solo e o relaxamento da malha.

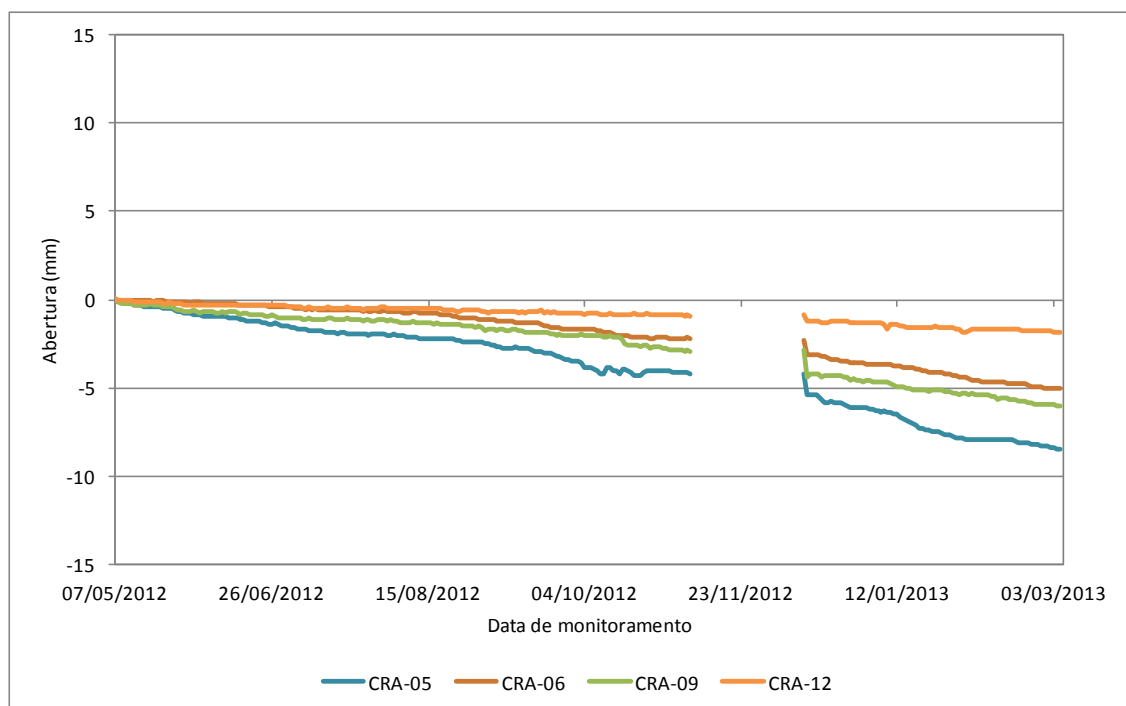


Figura 84 - Diagrama de frequências para as leituras correspondentes aos crackmeters colocados na ilha 4

A Figura 85 mostra que não é possível observar relação direta entre as variações dos instrumentos como resultado das precipitações.

Para avaliar as relações entre as leituras dos instrumentos, realizou-se a matriz de correlações correspondente (Tabela 28). Nesta pode-se verificar que a maioria dos instrumentos apresenta correlação forte. O sinal negativo em alguns casos indica somente a inclinação da reta de tendência. Nesta mesma tabela podem ser observadas as correlações entre os eventos pluviométricos e sua influência com respeito às leituras dos instrumentos, verificando-se que os valores são muito baixos devido à ausência de relação entre as variáveis.

Existem também instrumentos com valores de coeficientes de correlação baixos, como por exemplo, o coeficiente de correlação do CRA-07 com os demais instrumentos. Isto pode estar associado à frequência de oscilação, a qual apresenta muitas variações possivelmente causadas pelo que se denomina em estatística “ruído”.

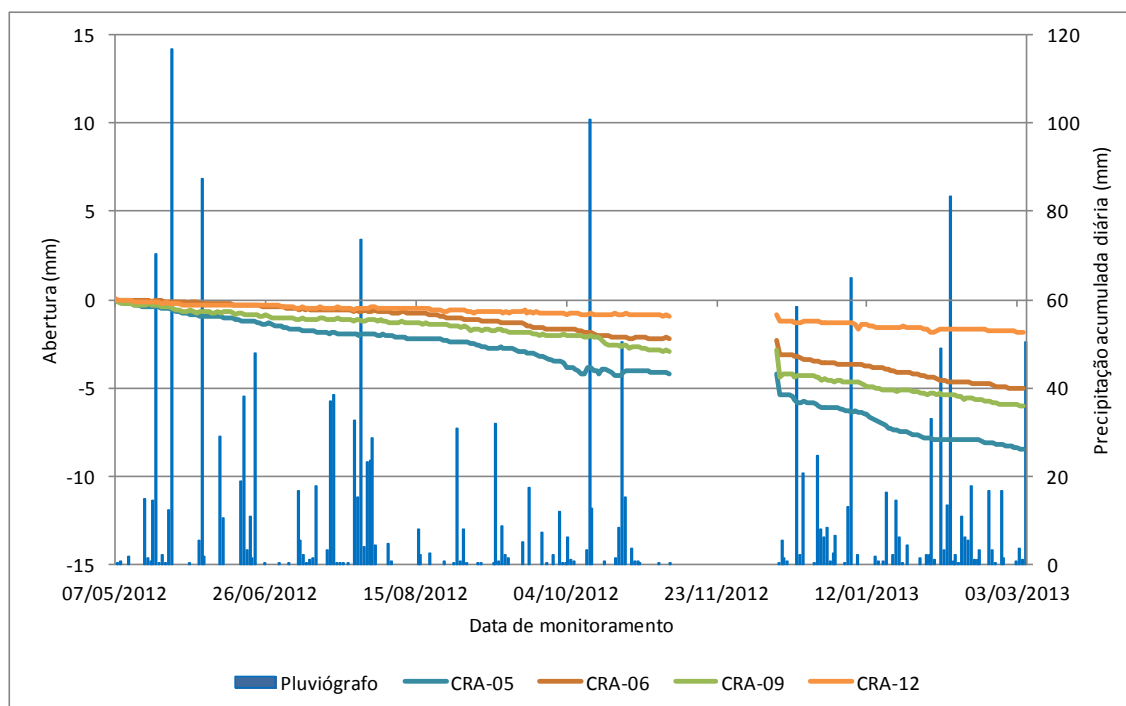


Figura 85 - Diagrama de frequências para as leituras correspondentes aos crackmeters colocados na ilha 4 e as precipitações acumuladas diárias

Contrariamente ao CRA-07, tem-se que o CRA-01, apesar de se encontrar sozinho em uma ilha diferente apresenta valores de coeficiente de correlação médios com respeito aos outros instrumentos.

Em geral, as leituras dos *crackmeters* apresentam uma correlação forte com respeito às células de carga e alguns *strain gauges* indicando a estabilidade do sistema. Os valores destas correlações cruzadas podem ser observadas no Anexo 1.

Tabela 28 - Matriz de coeficientes de correlação entre a leitura dos crackmeters e o pluviógrafo

	Pluviógrafo	CRA-01	CRA-02	CRA-03	CRA-04	CRA-05	CRA-06	CRA-07	CRA-08	CRA-09	CRA-10	CRA-11	CRA-12
Pluviógrafo	1	0,019	0,004	0,054	-0,012	0,001	-0,001	0,046	-0,059	0,003	0,003	-0,001	0,002
CRA-01	0,018	1	0,829	0,815	-0,812	0,835	0,824	0,373	-0,813	0,813	0,773	0,806	0,817
CRA-02	0,004	0,829	1	0,854	-0,982	0,989	0,992	0,455	-0,854	0,995	0,947	0,985	0,985
CRA-03	0,053	0,815	0,854	1	-0,841	0,887	0,863	0,405	-0,928	0,851	0,875	0,840	0,889
CRA-04	-0,012	-0,812	-0,981	-0,841	1	-0,982	-0,985	-0,442	0,827	-0,986	-0,932	-0,981	-0,978
CRA-05	0,001	0,835	0,988	0,887	-0,982	1	0,996	0,458	-0,871	0,992	0,960	0,987	0,994
CRA-06	-0,001	0,825	0,991	0,863	-0,985	0,996	1	0,458	-0,846	0,996	0,954	0,996	0,990
CRA-07	0,046	0,374	0,456	0,406	-0,442	0,459	0,458	1	-0,388	0,464	0,412	0,447	0,456
CRA-08	-0,058	-0,814	-0,854	-0,928	0,827	-0,871	-0,846	-0,389	1	-0,843	-0,811	-0,812	-0,864
CRA-09	0,003	0,814	0,995	0,851	-0,986	0,992	0,996	0,465	-0,844	1	0,953	0,992	0,990
CRA-10	0,002	0,773	0,947	0,875	-0,933	0,960	0,954	0,413	-0,811	0,953	1	0,951	0,963
CRA-11	-0,001	0,806	0,985	0,841	-0,981	0,987	0,996	0,448	-0,813	0,992	0,951	1	0,982
CRA-12	0,002	0,817	0,985	0,890	-0,978	0,994	0,990	0,456	-0,864	0,990	0,963	0,982	1

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

5.4 Validação das leituras e dificuldades encontradas

Em seguida são apresentados alguns itens correspondentes à validação das leituras e as dificuldades encontradas no decorrer do monitoramento da instrumentação instalada.

De modo geral, as dificuldades que se encontraram nesta análise correspondem à imprecisão na estimação dos parâmetros resultantes da instrumentação.

5.4.1 Piezômetros

Como método para validar as leituras dos piezômetros, foram consideradas as leituras do medidor do nível de água instalado no furo da sondagem SM-04 na parte intermediária do sistema de contenção, tomando em consideração a diferença entre as leituras do medidor de nível d'água e os piezômetros.

Nesta avaliação tomaram-se 14 valores de leituras do nível de água obtidas através do monitoramento realizado nas visitas de campo e compararam-se com as leituras dos instrumentos na mesma ilha para consequentemente calcular o coeficiente de correlação entre estes valores.

Na Figura 86 apresenta-se os dados obtidos juntamente com os do piezômetro PZE-01, podendo-se observar a semelhança na variação das leituras.

Uma vez analisada a variação entre as leituras, realizou-se o diagrama de dispersão para verificar a possível correlação entre as mesmas. A Figura 87 apresenta o diagrama correspondente para estes dados juntamente com o valor do coeficiente de determinação.

Como resultado da elaboração deste diagrama obteve-se o valor do coeficiente de correlação, sendo este de 0,80 o que indica uma correlação forte entre as leituras.

Estes procedimentos foram realizados também para as leituras dos piezômetros instalados a menor profundidade na mesma ilha com a finalidade de validar os resultados.

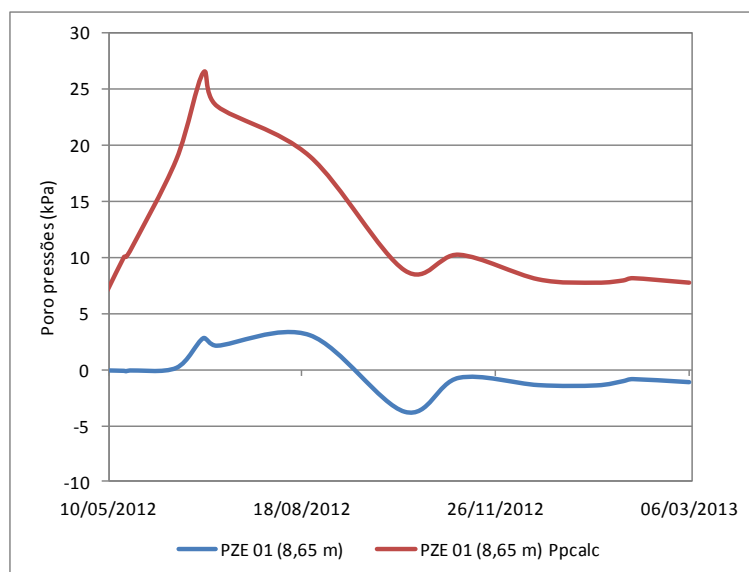


Figura 86 - Diagrama de frequência para valores de leituras do PZE-01 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água

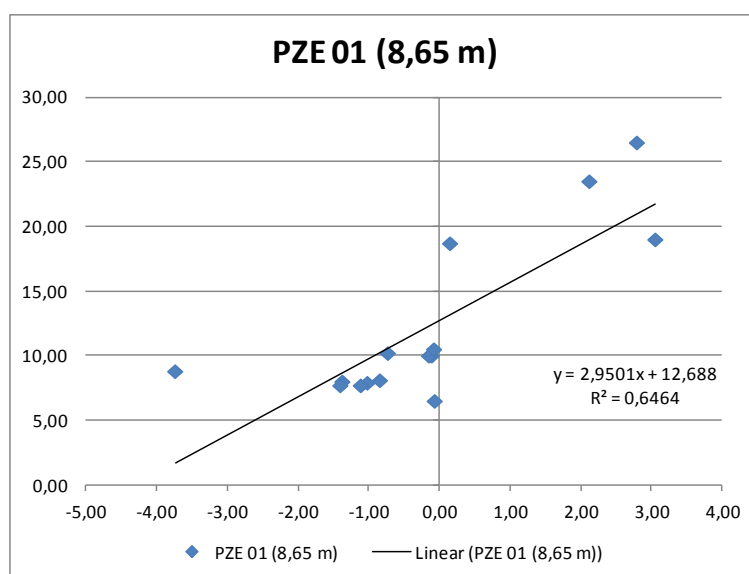


Figura 87 - Diagrama de dispersão para os valores de leituras do PZE-01 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água

Na Figura 88 mostra-se a variação das leituras do PZE-02 e o valor de poro pressão calculado a partir do nível de água da SM-04. Nota-se diferenças entre a poro pressão calculada e a obtida pelo instrumento.

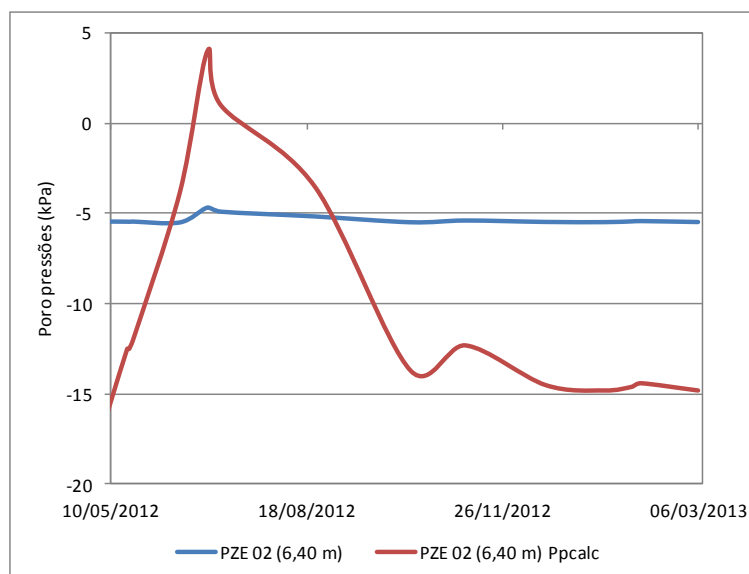


Figura 88 - Diagrama de frequência para valores de leituras do PZE-02 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água

Quando realizado o diagrama de dispersão para estes valores (Figura 89) observou-se que no momento do cálculo do coeficiente de correlação se obteve um valor forte (0,87), o que não era esperado com base na comparação da tendência das leituras.

Este resultado representa o nível de correlação estatística dos valores das leituras e descreve a possível relação entre estes, mesmo que graficamente possa ser observado que as oscilações sejam diferentes.

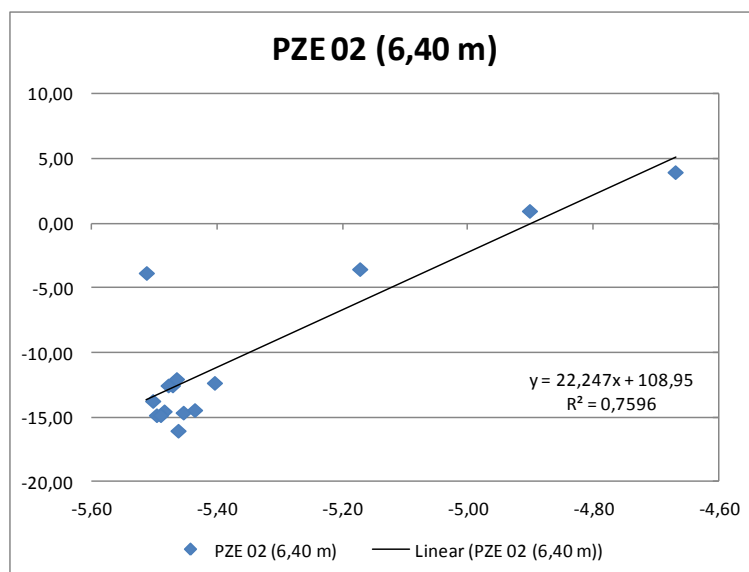


Figura 89 - Diagrama de dispersão para os valores de leituras do PZE-02 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água

Quando comparadas as leituras do PZE-03 instalado a 3,90 m de profundidade pode ser observado que as variações na tendência apresentam-se ainda com uma diferença maior (Figura 90).

Ao ser realizado o diagrama de dispersão para verificar a correlação entre estas leituras foi observado que o coeficiente de determinação mostrou-se menor devido à dispersão das leituras (Figura 91).

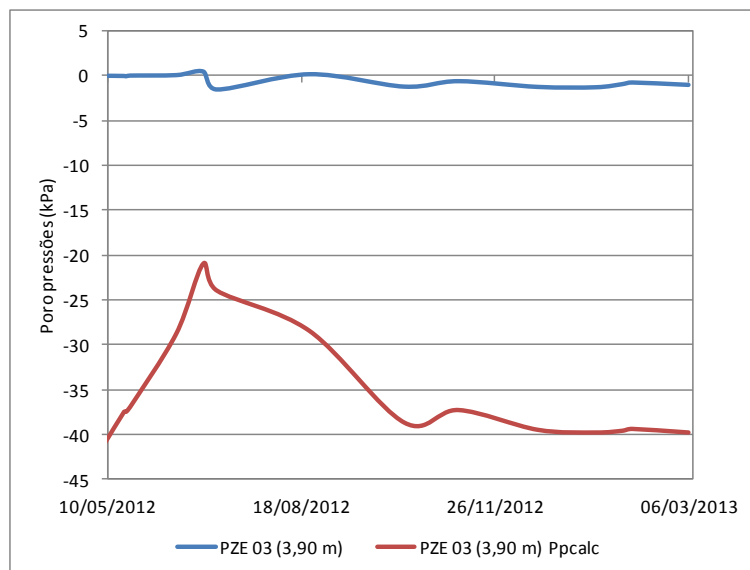


Figura 90 - Diagrama de frequência para valores de leituras do PZE-03 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água

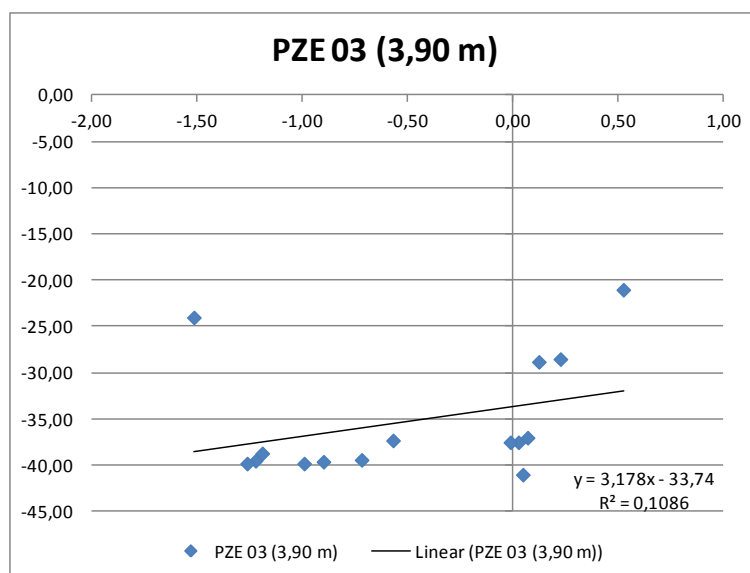


Figura 91 - Diagrama de dispersão para os valores de leituras do PZE-02 obtidas através do monitoramento e para valores de poro pressão calculados a partir do nível de água

Esta diferença, que dita em termos de correlação apresentou um valor de 0,33, pode ser produto do espaçamento e a profundidade entre o medidor de nível de água e o instrumento.

5.4.2 Tensiômetros

Os tensiômetros tem a característica de serem instrumentos com possibilidade de verificação quanto às leituras obtidas, por meio das leituras do manômetro no momento da verificação em campo.

Com a finalidade de verificar as leituras, foi realizado um experimento em campo no dia 31 de janeiro de 2013, que consistiu em acompanhar o monitoramento programado para intervalos de hora em hora registrando as leituras dos manômetros numa planilha de campo ao mesmo tempo que eram coletadas as leituras automatizadas. Na sequência apresentam-se os gráficos onde podem ser observadas as diferenças entre as leituras manuais e leituras automatizadas dos tensiômetros, além dos coeficientes de correlação calculados para o par de leituras de cada instrumento.

Para o tensiômetro 1, as leituras obtidas no monitoramento e as realizadas em campo neste estudo apresentam uma diferença de até 13,5 kPa. Existem horários nos quais a diferença entre as medições é desprezível (Figura 92). O coeficiente de correlação para este par de leituras é considerado forte, apresentando o valor de 0,98 (Tabela 29).

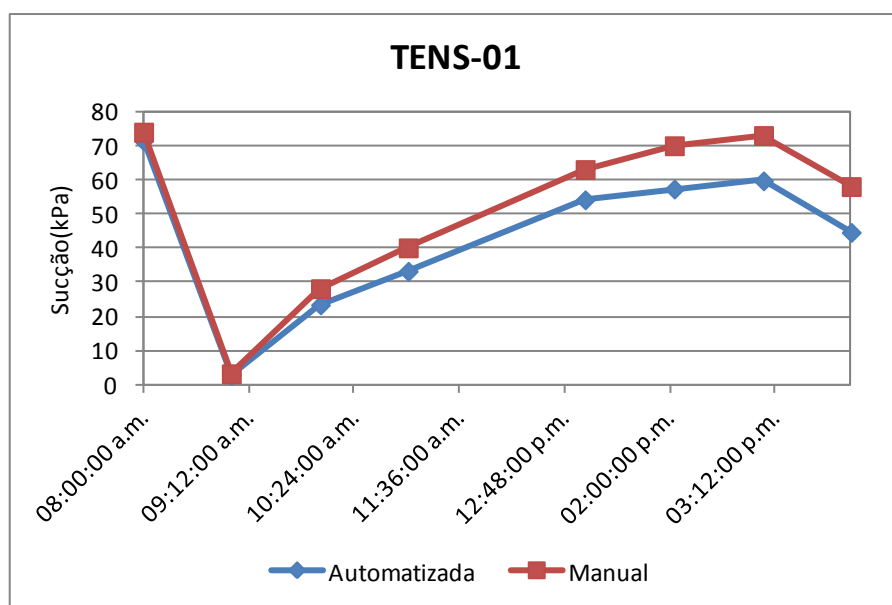


Figura 92 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 01

Tabela 29 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-01

TENS-01		
	Automatizada	Manual
Automatizada	1	0,98
Manual	0,98	1

A Figura 93 apresenta o gráfico correspondente às leituras manuais e automatizadas realizadas nas visitas de campo e pelo *data logger* na mesma hora para o tensiômetro 02. Neste gráfico pode-se apreciar que as leituras apresentam diferenças com magnitude entre 3 e 8 kPa. O coeficiente de correlação calculado para este par de leituras é considerado forte, com valor de 0,98 (Tabela 30).

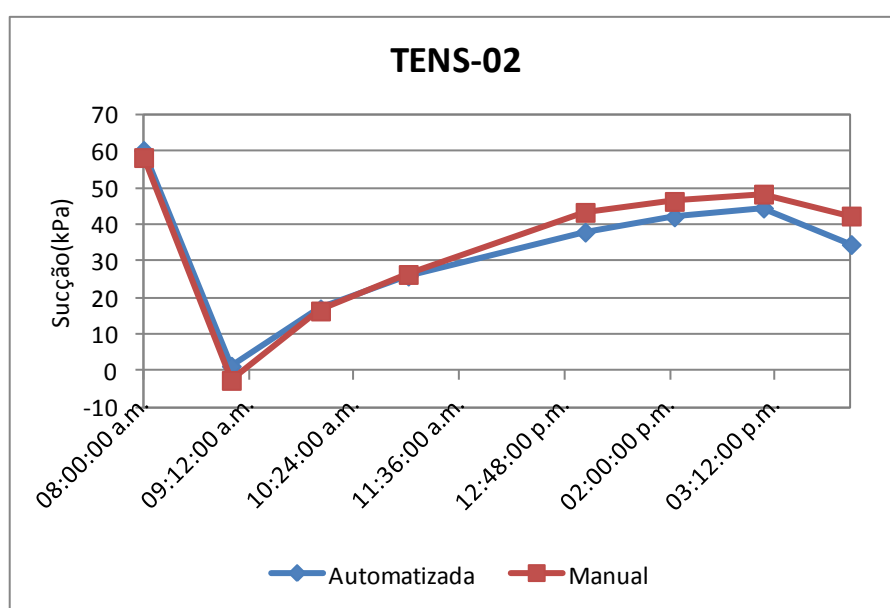


Figura 93 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 02

Tabela 30 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-02

TENS-02		
	Automatizada	Manual
Automatizada	1	0,98
Manual	0,98	1

O tensiômetro 03 apresenta diferenças entre o par de leituras variando entre 0,8 e 11,4 kPa (Figura 94). O coeficiente de correlação entre as leituras é considerado forte, apresentando o valor de 0,96 (Tabela 31).

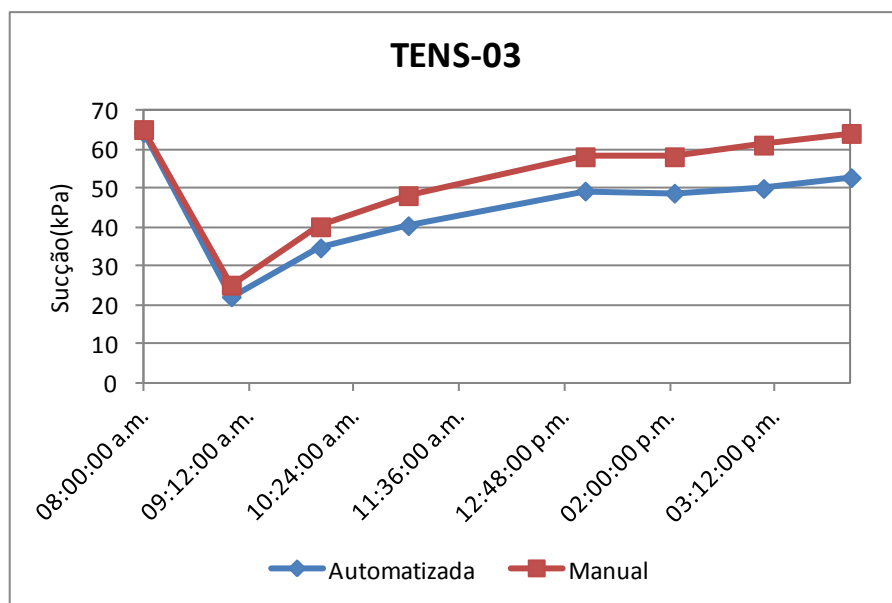


Figura 94 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 03

Tabela 31 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-03

	TENS-03	
	Automatizada	Manual
Automatizada	1	0,96
Manual	0,96	1

O tensiômetro 04 apresenta uma diferença aparentemente constante entre as leituras automatizadas e as manuais (Figura 95). Esta diferença entre as leituras tem uma magnitude em média de 7,8 kPa. Quanto ao coeficiente de correlação calculado através do diagrama de dispersão, observa-se um valor médio a forte de 0,81 (Tabela 32).

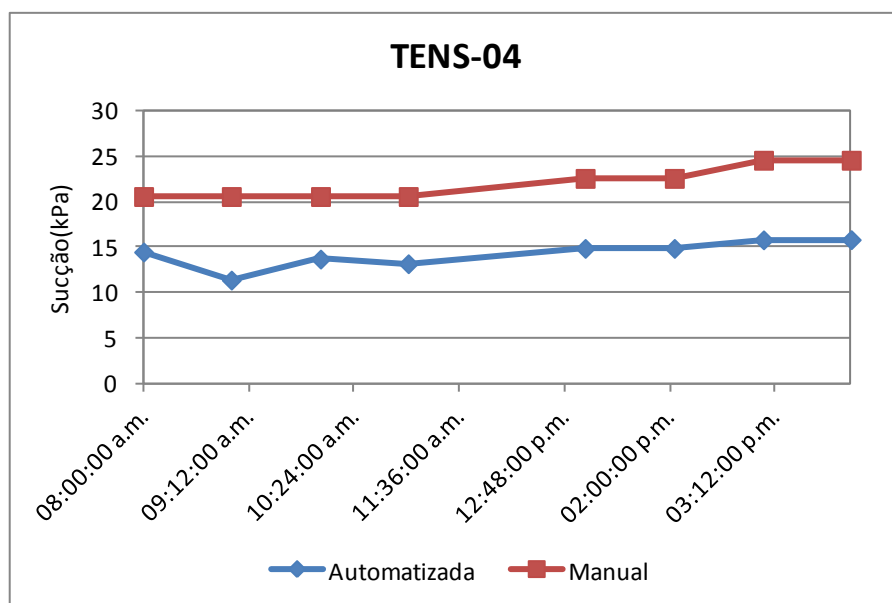


Figura 95 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 04

Tabela 32 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-04

	TENS-04	
	Automatizada	Manual
Automatizada	1	0,81
Manual	0,81	1

O tensiômetro 05 apresenta no diagrama de frequência uma diferença maior entre as leituras com variações ao longo do experimento (Figura 96). O coeficiente de correlação entre as leituras deste instrumento, apesar de ter variações consideráveis, tem valor de 0,80 (Tabela 33).

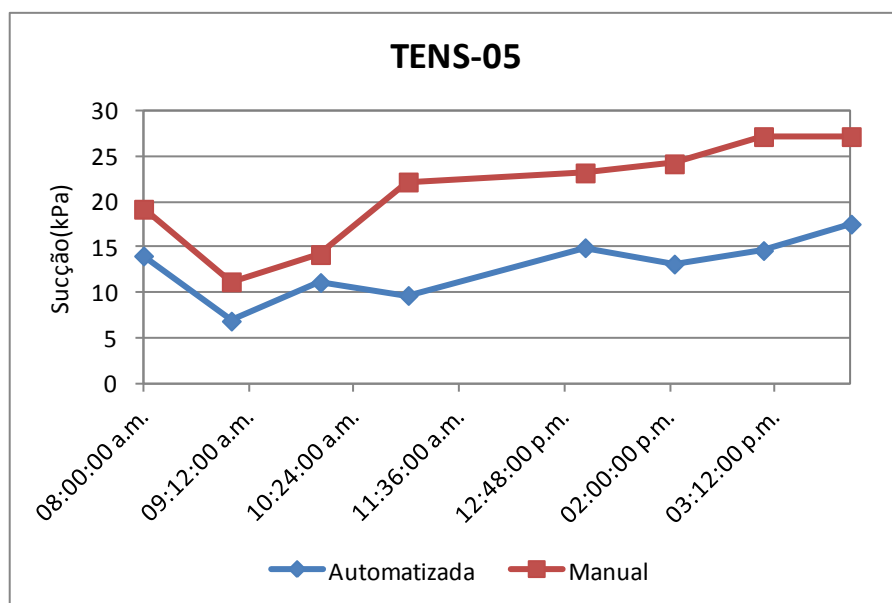


Figura 96 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 05

Tabela 33 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do TENS-05

	TENS-05	
	Automatizada	Manual
Automatizada	1	0,8
Manual	0,8	1

O tensiômetro 06 é o instrumento que apresenta a maior diferença entre as leituras. No começo do experimento apresentou oscilação semelhante mudando de maneira notável a partir da quarta hora do experimento (Figura 97). O coeficiente de correlação calculado entre o par de leituras de este instrumento é baixa, com valor de 0,25 (Tabela 34).

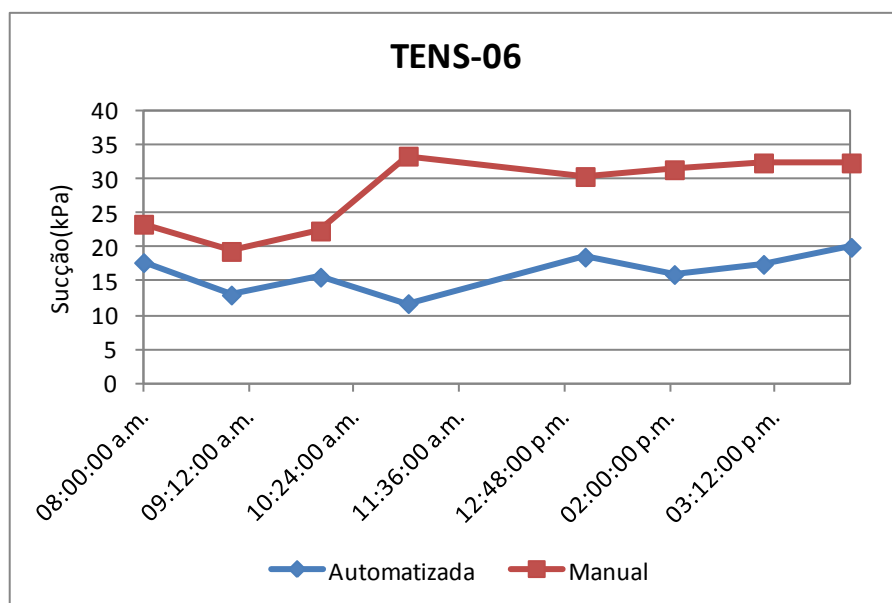


Figura 97 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 06

Tabela 34 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do tensiômetro 06

	TENS-06	
	Automatizada	Manual
Automatizada	1	0,25
Manual	0,25	1

Na Figura 98 apresenta-se o diagrama de frequência obtido a partir das leituras do tensiômetro 07. Pode observar-se que no começo do experimento os valores tendem a ficar próximos até a leitura manual começar a variar a partir da quinta hora, enquanto a leitura automatizada mantém-se constante. O valor de correlação obtido entre este par de leituras apresenta-se médio-forte (0,75) (Tabela 35).

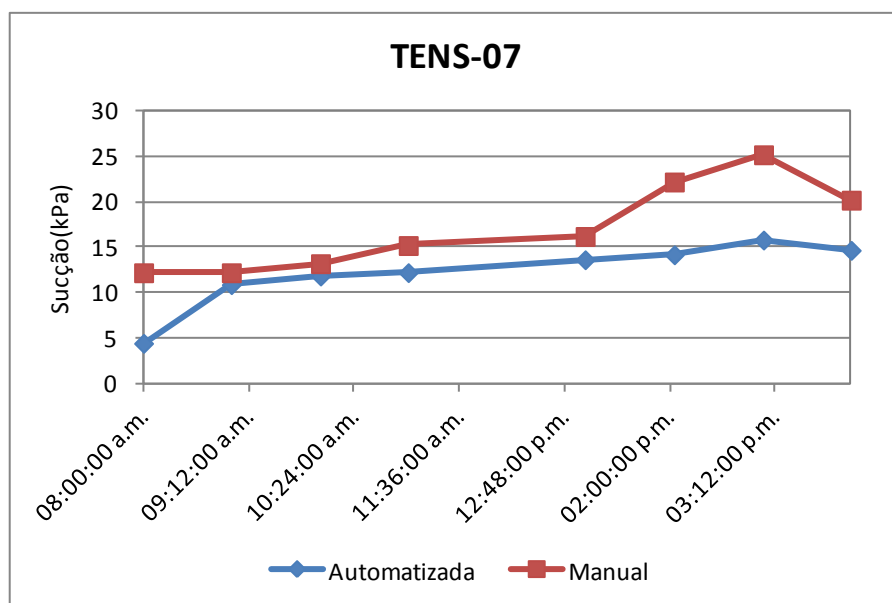


Figura 98 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 07

Tabela 35 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do tensiômetro 07

	TENS-07	
	Automatizada	Manual
Automatizada	1	0,75
Manual	0,75	1

O diagrama de frequência correspondente às leituras obtidas do tensiômetro 08 apresenta uma diferença considerável quanto à oscilação das leituras (Figura 99). Enquanto os valores obtidos pela leitura automatizada mantêm-se estáveis com tendência ao aumento, as leituras manuais além de terem valores maiores apresentam maiores variações. O coeficiente de correlação calculado para este instrumento é considerado médio, com valor de 0,57 (Tabela 36).

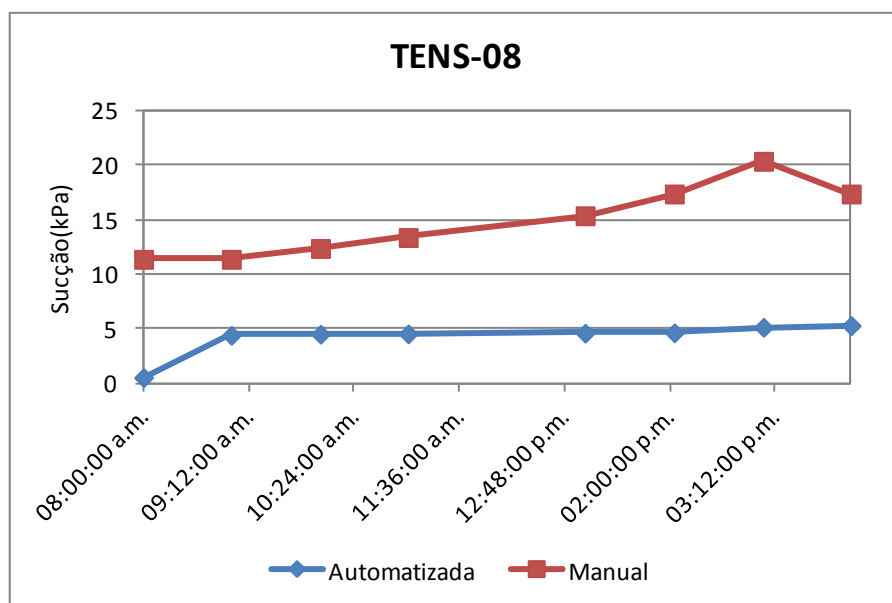


Figura 99 - Diagrama de frequência para leituras manuais e automatizadas coletadas de hora em hora para o tensiômetro 08

Tabela 36 - Matriz de correlação entre as leituras automatizadas e manuais do tensiômetro 08

	TENS-08	
	Automatizada	Manual
Automatizada	1	0,57
Manual	0,57	1

Considerando as leituras obtidas nas diferentes visitas de campo durante o monitoramento e antes do experimento, realizou-se a análise das correlações para estas datas e comparadas com o experimento. A Tabela 37 apresenta os coeficientes de correlação onde pode-se observar a variação entre as leituras. Pode-se descrever os aumentos nos tensiômetros TENS-02 e TENS-07, as diminuições nos valores dos tensiômetros TENS-01, TENS-03, TENS-04, TENS-05, TENS-06 e a igualdade para o tensiômetro TENS-08. A maior variação ocorreu no tensiômetro TENS-06, com uma diminuição de 0,62 entre o coeficiente das visitas e do experimento.

Tabela 37 - Coeficientes de correlação calculados a partir das leituras automatizadas e manuais a partir dos dados coletados nas visitas de campo e o experimento realizado o dia 31 de janeiro de 2013

	TENS 01	TENS 02	TENS 03	TENS 04	TENS 05	TENS 06	TENS 07	TENS 08
Visitas	0,99	0,96	0,99	0,97	0,90	0,87	0,61	0,57
Experimento	0,98	0,98	0,96	0,81	0,80	0,25	0,75	0,57

Os valores são diferentes de 0 com nível de significância $\alpha=0,05$

5.4.3 Leituras do pluviógrafo

O entupimento do filtro do pluviógrafo em duas datas diferentes gerou uma incerteza de 35 dias na obtenção de dados de precipitações nos meses de Novembro e Dezembro de 2012 e nas leituras do mês de março de 2013, sendo esta última a menos extensa em termos de tempo de incerteza, pois foi descoberta com apenas três dias de ausência de leituras.

Quando realizados os cálculos para a correlação das leituras do pluviógrafo do Morro do Boi e a estação pluviométrica de Itajaí A868, gerou-se o diagrama de dispersão para os dados correspondentes a datas com leituras em ambos instrumentos, a fim de se validar a correlação. A partir deste diagrama gerou-se a linha de tendência linear através da qual se obteve a equação de uma reta.

A partir da equação da linha de tendência podem ser obtidos os valores de precipitação que provavelmente poderiam ter ocorrido na encosta durante o tempo em que o sistema ficou sem realizar as leituras.

Cabe salientar que através deste cálculo não podem ser detalhados os eventos diários, visto que se trata de uma aproximação por média de eventos acumulados mensalmente.

A Tabela 38 apresenta os valores de leituras para os meses de abril de 2012 até março de 2013 com os valores de precipitação acumulada mensal sem discriminação de compatibilidade de ocorrência por data.

A partir destes dados foi realizado um diagrama de barras similar ao realizado na análise das leituras de pluviógrafo anterior com os eventos registrados durante os meses de novembro e dezembro na estação meteorológica de Itajaí (Figura 100) e os dados do pluviógrafo do Morro do Boi até o dia 07 de novembro e a partir do dia 13 de dezembro, datas nas quais se tem certeza do correto funcionamento do pluviógrafo.

Tabela 38 - Tabela de ocorrência de precipitações acumuladas por mês com todos os valores registrados

Ano	Mês	Morro do Boi (mm)	Itajai A868 (Inmet) (mm)
2012	Abril - 12	141,25	117
	Maio - 12	245,75	156
	Junho - 12	254,25	160
	Julho - 12	325,00	206
	Agosto - 12	61,75	41
	Setembro - 12	77,25	52
	Outubro - 12	217,75	137
	Novembro - 12	0,5	59
	Dezembro - 12	140	104
2013	Janeiro - 13	137	110
	Fevereiro - 13	270,75	186
	Março - 13	55,75	37

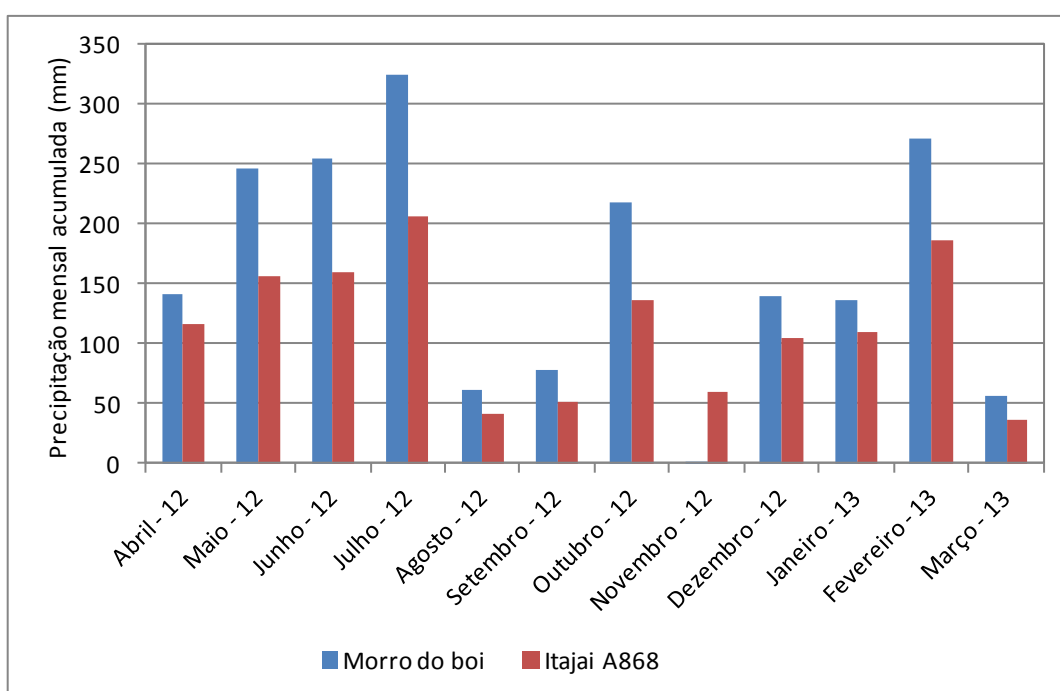


Figura 100 - Diagrama de barras onde apresenta-se o acumulado mensal para a estação meteorológica Itajaí A868 durante os meses de novembro e dezembro

Com os valores completos dos eventos ocorridos da estação meteorológica Itajaí A868 e com a equação da reta obtida através do diagrama de dispersão realizada na análise de correlação entre as leituras, obteve-se os valores

aproximados dos acúmulos mensais de precipitações para os meses de novembro e dezembro no Morro do Boi.

Os valores médios calculados, apresentam-se como resultado de que no mês de novembro de 2012, no Morro do Boi, possivelmente ocorreu um acúmulo de precipitações mensais de aproximadamente 86,27 mm sendo calculada a incerteza durante a falha no instrumento como de 85,73 mm. Enquanto no mês de dezembro, a incerteza ou diferença entre o valor de chuvas registradas e o valor de chuvas calculadas pela correlação teve um incremento de 19,33 mm, ou seja, de 140 mm aumentou para 159,33 o valor de possíveis precipitações registradas para este mês.

Com base nestes resultados, foi realizada uma nova tabela na qual apresentaram-se os valores de pluviometria real da estação meteorológica Itajai A868 e os valores reais e calculados (novembro e dezembro) do pluviógrafo do Morro do Boi (Tabela 39).

Tabela 39 - Tabela de ocorrência de precipitações acumuladas por mês com os valores registrados e calculados

	Mês	Morro do Boi (mm)	Itajai A868 (Inmet) (mm)
2012	Abril - 12	141,25	117
	Maio - 12	245,75	156
	Junho - 12	254,25	160
	Julho - 12	325,00	206
	Agosto - 12	61,75	41
	Setembro - 12	77,25	52
	Outubro - 12	217,75	137
	Novembro - 12	86,27	59
	Dezembro - 12	159,33	104
2013	Janeiro - 13	137	110
	Fevereiro - 13	270,75	186
	Março - 13	55,75	37

A partir destes resultados foi realizado o diagrama de barras para observar as variações (Figura 101).

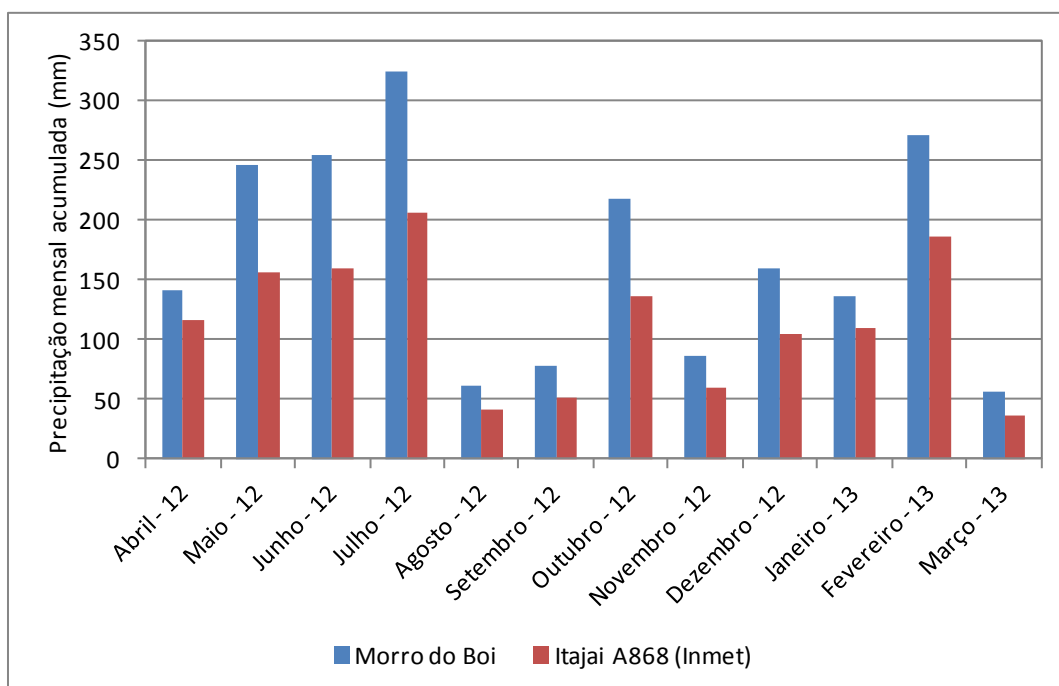


Figura 101 - Diagrama de barra onde se apresentam os eventos reais e calculados para os dados pluviométricos de Morro do Boi

O valor de precipitações pluviométricas calculado para o mês de novembro de 86,27 mm considera-se pouco significativo devido que não apresenta influência nas variações dos níveis de poro pressão, os quais apresentaram tendência a diminuição e com respeito aos valores de sucção, tendência ao aumento. Consequentemente, pode ser considerado como um mês onde a quantidade de chuva não influenciou nas leituras.

5.4.4 Vegetação

Como parte das possíveis variáveis encontradas no decorrer da pesquisa, pode citar-se o aumento da vegetação no local de estudo. Na Figura 102 pode-se observar o aumento da vegetação circundante na parte intermediária da encosta, onde se encontra parte da instrumentação instalada, especialmente a ilha de tensiômetros. Através destas imagens tomadas em abril de 2012 e março de 2013 observa-se a variação da densidade e tamanho da vegetação.



Figura 102 - Imagens onde pode ser observado o nível intermediário do sistema de monitoramento com a variação da vegetação. Na esquerda no mês de abril de 2012 e na direita no mês de março de 2013

Este fator é considerado como gerador de variações nas tendências das grandezas monitoradas. A abundante vegetação pode interferir na infiltração das precipitações visto que suas raízes, à medida de que vão crescendo, retiram a água retida no solo, causando o aumento na sucção matricial.

5.4.2 Data logger

A variação entre os horários de leitura geram também o que pode ser denominado como dificuldade nos parâmetros devido que os intervalos não podem ser tomados como padrão para uma interpretação das variações acontecidas todos os dias no mesmo intervalo horário.

A variação entre a leitura de um dia para o outro apresenta uma defasagem de aproximadamente 12 min, ou seja, todos os dias a leitura não é tomada no mesmo horário. Isto faz com que a leitura a cada cinco dias tenha só vinte e três leituras, quando deveria ter vinte e quatro.

Em função disso, deve-se adotar um critério para dar um valor ao intervalo horário necessário para realizar interpretações detalhadas no momento de fazer a análise das variações horárias de eventos em particular.

Porém, dependendo da análise a ser realizada, isto não é um fator determinante visto que na maioria das análises as séries de dados são discretizadas.

6. Conclusões

As rochas graníticas como as encontradas no local de estudo, pertencentes à Suite Intrusiva Nova Trento são caracterizadas por apresentar maior quantidade de quartzo em sua composição. Consequentemente, o tipo de solo que pode ser encontrado como resultado do intemperismo destas rochas possui características arenosas com pouca a média quantidade de argila.

Os ensaios de laboratório realizados para caracterizar o solo no local de estudo deram como resultado areia siltosa (SM), com umidade natural entre 12 e 28 %, limite de liquidez entre 16,1% e 48,5 %, limite de plasticidade entre 15 %, e 34,1 %, densidade dos grãos com média de 2,671 g/cm³ e ângulo de atrito entre 25,65° e 39,60°.

A análise da série de leituras de precipitações considerada neste estudo teve como característica principal que no período de monitoramento estes eventos pluviométricos não foram de grande magnitude.

Durante os primeiros três meses observou-se um período caracterizado por eventos de pouca intensidade em relação à taxa de precipitação pluviométrica por hora mas com durações prolongadas. Estas características antes mencionadas influenciaram significativamente as leituras dos instrumentos, em particular dos piezômetros, nos quais observaram-se respostas coerentes com relação aos eventos pluviométricos.

Iniciando o quarto mês, os eventos apresentaram-se dispersos e com valores de pluviometria baixos, considerando este segundo trimestre como um período seco em relação ao ocorrido no trimestre anterior. Pode-se notar que apesar de ser um período relativamente seco, ocorreram dois eventos significativos que tiveram influência no comportamento das leituras da instrumentação.

Nos últimos quatro meses de pesquisa, as precipitações mostraram um comportamento de grande intensidade horaria em lapsos de tempo muito curtos, o que pode produzir maior escoamento e menor infiltração. Como consequência, os níveis de poro pressões obtidos pelos instrumentos mantiveram-se estáveis até o final deste monitoramento. Cabe salientar que o tipo de solo caracterizado como

arenoso pode ser muito permeável de modo que se considera este fator como significativo juntamente com o fraturamento da rocha subjacente, os quais permitem uma rápida drenagem no maciço, diminuindo assim o acúmulo de poro pressões.

Os piezômetros apresentaram uma tendência à estabilização das leituras, possivelmente como consequência da pouca ocorrência de precipitações de grande intensidade durante o período de monitoramento e mudanças nas condições da encosta ao longo do tempo (incremento da vegetação) que podem interferir na infiltração das precipitações.

Observando-se a tendência das leituras dos piezômetros para o período considerado nesta pesquisa pode-se descrever que estes apresentam um possível ciclo que começa com valores baixos a negativos de poro pressões, seguido do aumento destes valores nos instrumentos colocados a maior profundidade durante os meses ou período úmido caracterizados por chuvas de baixa intensidade horária, mas de longa duração durante o dia.

A vegetação apresentou-se como um fator independente que possivelmente interfere significativamente nas medidas de sucção, elevando os valores de leituras até em instrumentos colocados a 2,00 m de profundidade como é o caso do tensiômetro TENS-02.

Os tensiômetros apresentaram correlação forte durante os primeiros três meses de leituras, diminuindo seus valores ao longo do tempo de monitoramento de maneira significativa para alguns instrumentos mais que para outros.

Porém, todos estes instrumentos apresentaram a mesma tendência ao aumento da sucção ao longo do período monitorado nesta dissertação. Pode-se verificar também que as leituras de sucção no local de estudo diminuem com a profundidade, o que é coerente com um perfil de umidade para zona ativa.

Quanto aos deslocamentos horizontais, a análise das leituras obtidas demonstrou que existe estabilidade nos dois locais onde foram instalados os tubos guias dos inclinômetros, com leves variações de até ± 2 mm. Esta medida é insignificante quanto a deslocamentos e pode-se interpretar como dentro da faixa de precisão do instrumento, pois não existe um vetor que indique uma tendência nas medidas coletadas.

Com respeito aos instrumentos instalados no sistema de contenção, tem-se que as leituras apresentaram-se estáveis, podendo-se concluir que, até a data de conclusão desta dissertação, o sistema permaneceu relativamente invariável, sem ocorrências de solicitações.

Os “*strain gauges*” analisados apresentaram comportamentos complexos quanto à leitura obtida. Processos como a contração do graute e fatores como colagem dos instrumentos às barras e instalação nos furos, podem gerar incertezas quanto a posição final do instrumento.

As séries de leituras dos “*crackmeters*” por sua vez apresentaram-se estáveis observando-se medidas que quando comparadas com a capacidade do instrumento resultaram insignificantes, indicando a não ocorrência de deslocamentos durante o período monitorado.

Em geral, as características geológicas e geotécnicas da área de estudo, a provável alta taxa de infiltração e permeabilidade da rocha alterada assim como a característica granulométrica areno-siltosa do solo facilitam a rápida infiltração e drenagem através do sistema de fraturas do maciço rochoso.

No presente trabalho observou-se que as precipitações pluviométricas teriam incidência quanto às mudanças volumétricas do solo induzidas pelas variações nas condições de umidade, fato perceptível nas leituras das células de cargas, embora não apresentem valores de correlações entre as mesmas.

Estas possíveis incidências nas mudanças volumétricas não puderam ser interpretadas a fim de validar tal hipótese, porém deve ser um tema a considerar na continuidade das pesquisas.

6.1 Sugestões

Entre as sugestões que podem ser enunciadas para aprimorar as análises e dar compreensão aos problemas e necessidades quanto à análise destas séries de dados, se recomenda:

- Realizar análises tensão-deformação para simular as condições atuantes na encosta e nos grampos.
- Prosseguir com a coleta de dados do monitoramento instalado a fim de ampliar a série histórica e buscar interpretar modelos que permitam a predição.
- Analisar a relação entre a vegetação e precipitações pluviométricas quanto à infiltração e implicações em novas áreas ou campos de estudo.

Apêndice

Procedimentos para realizar a coleta de dados

Para realizar a coleta dos dados das leituras armazenadas no *data logger*, uma equipe composta geralmente por dois integrantes deslocava-se desde Curitiba, PR, até o local de estudo na pista Sul da BR 101, Km 140+700m.

Uma vez no local de estudo, se subia até a casa de leituras por uma trilha aberta durante os trabalhos de colocação do sistema de contenção. Uma vez na casa de leituras, a equipe conecta um computador portátil ao *data logger*, verificando que o computador reconheça a conexão na porta COM do sistema. Este passo pode ser feito através do painel de controle do computador, no item Gerenciador de Dispositivos, subitem Portas COM/LPT.

Antes de abrir o software Multilogger, verifica-se que a interface esteja funcionando. Para isto abre-se a janela MLGateway e certifica-se que o cronômetro da janela esteja funcionando, registrando os minutos de conexão (Figura 103)

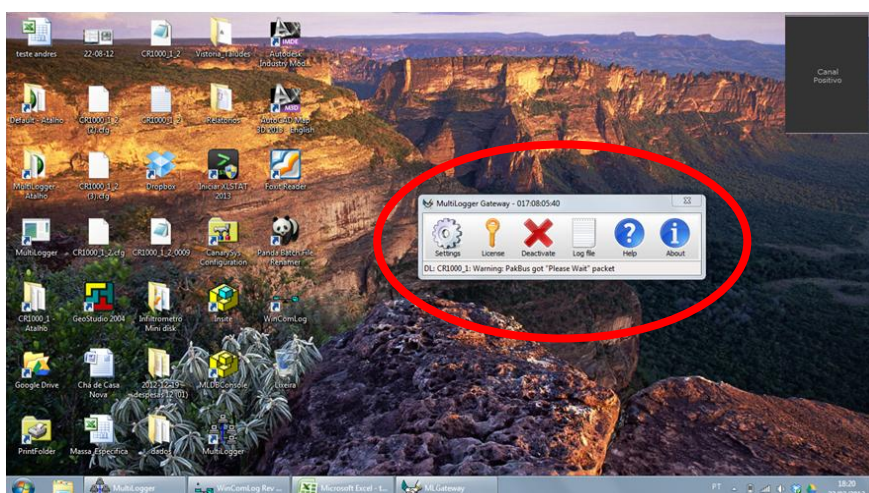


Figura 103 - Vista da janela de interface do software MultiLogger

Uma vez verificado o funcionamento da interfase se abre o software MultiLogger da Geokon, e se seleciona a porta COM que foi aceita pelo computador anteriormente (Figura 104). Depois de selecionada a porta COM, se seleciona o

subitem CR1000_1. Logo após, na barra de tarefas superior, se seleciona o comando “Logger” (Figura 105).

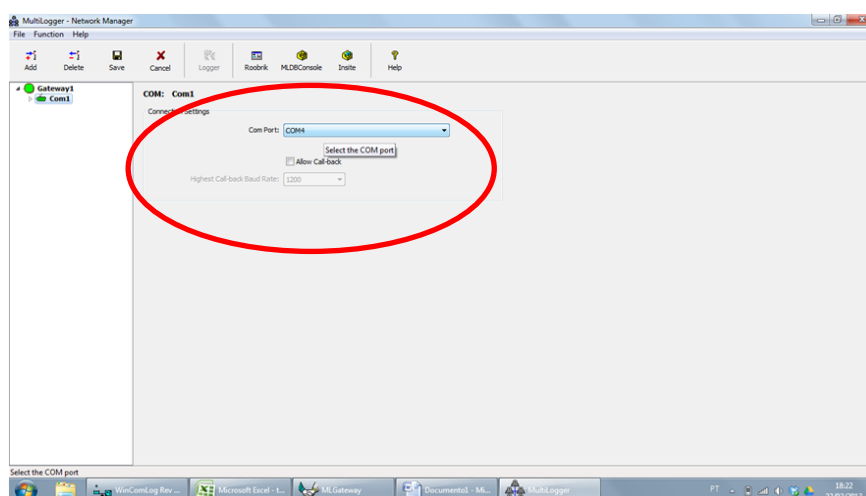


Figura 104 - Vista da janela de início do programa MultiLogger

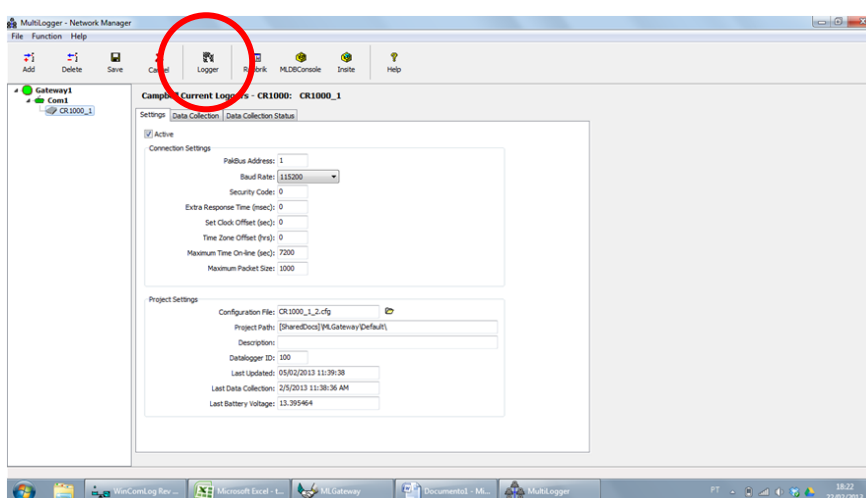


Figura 105 - Vista da janela do CR1000_1, onde se pode verificar que o programa está pronto para realizar a conexão com o data logger e começar a coletar os dados

Realizados estes passos, o programa estará pronto para fazer a coleta das leituras armazenadas. Para isto se seleciona o comando “Collect” localizado na barra superior.

Como método de verificação de funcionamento do sistema, novas medições são realizadas a cada dois minutos após a última leitura coletada, por até dez minutos. Para isto, abre-se a aba “Program” e mudam-se os parâmetros de leitura

nos itens “Interval Type, Single Interval” para a mudança do intervalo de tempo e no item “Stop and Start Times” para selecionar o mês, dia, hora, minuto e segundo em que se deseje começar a realizar leituras e seleciona-se o comando “Update” para que o programa efetue as alterações na programação (Figura 106).

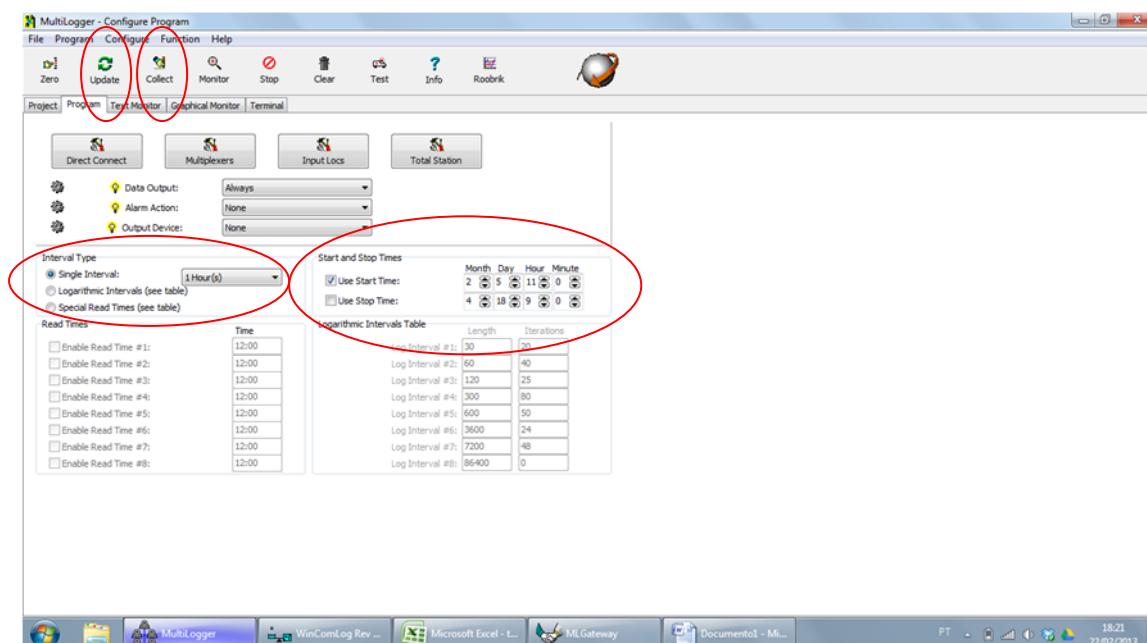


Figura 106 - Vista da janela do programa MultiLogger com conexão ao data logger. Neste desenho pode ser observado os campos onde se encontram os comandos para coleta de dados, modificar intervalos de leitura e a data, e o comando de atualizar as modificações

Depois de ter verificado o correto funcionamento durante os dez minutos, o que corresponde a cinco leituras, se seleciona o comando “Collect” novamente para coletar os dados e muda-se a programação para que sejam feitas as leituras em intervalos de hora em hora novamente. Para isto se repete o passo anterior.

Uma vez realizadas as leituras do *data logger*, se procede a verificar o estado dos tensiômetros e realizar a leitura manual destes. Para isto devem ser colocados os equipamentos de segurança (EPI) os quais são necessários para realizar o descenso até os instrumentos que ficam no médio da encosta devido à declividade e à escorregadiça superfície criada pela malha metálica e a vegetação presente (Figura 107).

Esta verificação contempla a observação da leitura do manômetro no tensiômetro e o preenchimento da ficha de leituras de campo com os valores

observados além de verificar se o nível de água no tubo é correto e se o reservatório encontra-se cheio o vazio. Caso falte água no tubo do tensiômetro ou no reservatório, preenche-se o reservatório com água e bombeia-se até tirar o ar que possa estar no sistema, garantindo assim o vácuo neste.



Figura 107 - Descenso até a ilha de instrumentos no médio da encosta com o uso de EPI's e corda de segurança

Depois de observados os tensiômetros, realiza-se a leitura do pluviôgrafo. Para isto conecta-se o computador portátil ao *data logger* do instrumento (Figura 108), certifica-se que o computador reconheça o equipamento realizando os mesmos passos usados para o MultiLogger através do painel de controle e por fim inicia-se o programa WinComLog, correspondente ao pluviôgrafo.



Figura 108 - Detalhe do data logger do pluviôgrafo

Uma vez iniciado o programa WinComLog do pluviógrafo, aciona-se o comando “*Status*” para verificar o estado do equipamento quanto ao nível da bateria, data, hora, entre outros (Figura 109).

Após verificação do estado do equipamento, realiza-se a leitura dos eventos armazenados na memória do *data logger*, através do comando “*dur*” e os dados são descarregados na tela do programa, tendo que ser selecionados e copiados manualmente para uma planilha de formato MS-Excel para posteriores análises e processamentos.

Site(SI):	Morro do Boi	Rainfall Channel ID(CHID):	0000001
LoggerID(ID):	ML8135	Rainfall Log Start:	24/03/12
Date(D):	17/01/13	Rainfall Inc.(Inc)	0.2/01
Time(T):	08:50:24	Rainfall Today(TDAY):	0.6
Baud Rate(BAUD):	9600	Rainfall Total(TOT):	1370.0
Response On/Off(RE):	On	Rainfall Units(U):	mm
Event Output(EV):	On	Events Left:	MEM WRAP
Battery Volt(BV):	3.6V	Memory Wrap(MW):	On
Clear1:	Go to sleep after(SLEEP):	0 min	
Clear2:			
Clear3:			
Clear4:			

Figura 109 - Informação obtida pelo acionamento do comando “Status” no software do pluviógrafo

Referências Bibliográficas

- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geostatística**. Editora Unisinos. 2003
- BASEI, M. A. S., CAMPOS NETO, M. C., CASTRO, N. A., NUTMAN, A. P., WEMMER, K., YAMAMOTO, M. T., HUECK, M., OSAKO, L., SIGA, O., PASSARELLI, C. R. **Tectonic evolution of the Brusque Group, Dom Feliciano belt, Santa Catarina, Southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences. ELSEVIER. 324-350 p. 2011.
- BEZERRA, M.I.S. **Apostila de análise de séries temporais**. DMEC/FCT/UNESP. 2006.
- BRAGA, A. C. O. **Módulo: métodos geoelétricos aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas**. IGCE/DGA/UNESP. 2007
- BUZZI, M. **Avaliação das correlações de séries temporais de leituras de instrumentos de monitoração geotécnico-estrutural e variáveis ambientais em barragens. Estudo de caso de Itaipu**. Dissertação de mestrado. UFPR. 2007.
- CARVALHO, P.A.S. **Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas**. Manual de geotecnia. IPT. São Paulo, 1991
- CARVALHO, J. V. **Modelagem temporal das medidas de vazão de drenos na Barragem de Funil (RJ) utilizando redes neurais e métodos estatísticos**. Tese de Doutorado. PUC-Rio. 2005.
- CHRISTIAN, J. T., BAECHER, G. B. **Unresolved problems in geotechnical risk and reliability**. GeoRisk 2011 © ASCE 2011.
- DEUS, M. L. D. **Séries temporais aplicadas ao planejamento da operação do sistema interligado nacional – SIN**. Dissertação de mestrado. PUC-Rio. 2008.
- DGSI. **Guide to Geotechnical Instrumentation**. Durham Geo Slope Indicator. 2004.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. John Wiley & Sons, Inc. USA 1988.
- DYMINSKI, A. **Noções de estabilidade de taludes e contenções**. UFPR.
- EHRLICH, M., et al. **Monitoramento das condições climáticas associadas às condições geológicas-geotécnicas da rodovia BR-116/RJ e seu entorno: correlação chuvas, piezometria e movimento das encostas dos Km 87 e KM 101 da BR-116/RJ**. Revista ANTT. V 2, N 2. ISSN: 2177-6571. 2010
- FEMA, **Federal Guidelines for Dam Safety**. U.S. Department of Homeland Security. 2004.

FIORI, A. P.. **II Relatório Interno de Pesquisa**. Recursos para Desenvolvimento Tecnológico – RDT. Projeto 03. Curitiba, 2011.

FIORI, A. P.. **IV Relatório Interno de Pesquisa**. Recursos para Desenvolvimento Tecnológico – RDT. Projeto 03. Curitiba, 2012.

FUSARO, T. C. **Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau**. Dissertação de mestrado. UFOP. 2007

GUILART, M. H. **Metodologia para a interpretação do monitoramento de escavações subterrâneas**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP. 2007

HIDALGO, C. ASSIS, A. **Evaluación de la incertidumbre en el análisis de estabilidad de un talud excavado en suelos residuales**. Pan-Am CGS Geotechnical Conference. 2011

HIDALGO, C. ASSIS, A. **Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: la teoría**. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol 10, pp 69-78. 2011

INEI, **Guía para la aplicación del análisis multivariado a las encuestas de hogares**. DTDIS-INEI. Lima, Perú. 2002.

KORMANN, A. C. M.; SESTREM, L. P.; ASAKAWA, S. **Avaliações de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea instrumentada**. In: WORKSHOP DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO NAS CONCESSÕES RODOVIÁRIAS, 7., 2011, Brasília. **Anais...**, p. 8-9, Brasília: RDT, 2011.

LANDIM P.M.B, **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. DGA UNESP/Rio Claro. SP. 2000.

LATORRE, M.R.D.O. CARDOSO, M.R.A. **Análise de séries temporais em epidemiologia**. Revista Brasileira de Epidemiologia. Vol 4, Nº 3. 2001.

LIMA, A. P., **Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. PUC-Rio. 2007.

MAIRAING, W. JOTISANKASA, A. SORALUMP, S. **Some applications of unsaturated soil mechanics in Thailand: an appropriate technology approach**. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. Vol. 43. No. 1. 2012

MCKENNA, G. **Erroneous reading from a vibrating wire piezometer with a broken signal wire**. Geotechnical Instrumentation News (GIN). 35-36 p. June 2005.

OLIVEIRA, R. M., **Desenvolvimento de elementos sensores de cerâmicas porosas de ZrO₂-TiO₂ para aplicação no monitoramento do conteúdo de água em solos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2010

OLIVEIRA, O. M., **Estudo de barreiras capilares por meio de simulação de chuva em coluna de solo**. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. 2007

PIEROZAN, R. **Análise estatística de séries de leituras piezométricas em barragens. Estudo de caso: Itaipu binacional – Blocos chave e setor principal**. Trabalho Final de Curso. DEC. UFPR. 2011.

RAHARDJO, H., LEONG, E. C., REZAUR, R. B., **Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall**. Hydrological Process 22. 506-523 p. 2008

RAHARDJO, H., LEONG, E. C., REZAUR, R. B., **The effect of antecedent rainfall on slope landslides**. Geotechnical and Geological Engineering 19. 371-379 p. © Kluwer Academic Publishers. 2001.

SANCHEZ, P. **Mapeamento espaço-temporal e previsão de pressões piezométricas em maciços rochosos de fundações de grandes barragens – Estudo de caso de Itaipu**. Dissertação de mestrado. UFPR. 2009.

SARÉ, A. R., **Comportamento de escavação grampeada instrumentada em solo residual**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. PUC-Rio. 2007.

SEIJAS, C. **El análisis multivariado de datos como herramienta en la exploración de modelos en la comprensión de variables psicológicas**. Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones. CIMPA-UCR 229-244p. 2000.

SELLERS, B. **The truth about accuracy**. Geotechnical Instrumentation News (GIN). 30-32 p. June 2005.

SESTREM, L. P. **Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea**. Dissertação de mestrado. PPGECC. UFPR. 2012

SILVEIRA, F. L. **Um exemplo de análise multivariada aplicada à pesquisa quantitativa em ensino de ciências: explicando o desempenho dos candidatos ao concurso vestibular de 1999 da universidade federal do rio grande do sul**. Publicado em INVESTIGAÇÕES EM ENSINO DE CIÊNCIAS, PORTO ALEGRE. 161 – 180 p. 1999.

SIMÕES, G. **Recalques em resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário de Belo Horizonte**. Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal. RN. 2004.

SOUZA, A. M., SAMOBYL, R. W., MALAVÉ, C. O., **Multivariate feed back control: an application in a productive process**. ELSEVIER. Computers & Industrial Engineering 46. 837 – 850 p. 2004.

TECGEOFISICA. **Relatório Geológico/Geofísico**. Relatório Interno. 2012.

TONUS, B. **Estabilidade de taludes: Avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense.** Dissertação de mestrado. UFPR. 2009.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática.** UFSM. CCNE. 2005.

VILLWOCK, R. **Técnicas de agrupamento e de hierarquização no contexto de KDD – Aplicação a dados temporais de instrumentação geotécnica-estrutural da usina hidrelétrica de itaipu.** Tese de Doutorado. PPGMNE-UFPR. 2009.

PORTO DE SANTOS. Departamento de imprensa. 2011. Acessado em agosto de 2012. <http://www.portodesantos.com.br/clipping.php?idClipping=17046>

GILLET, J. **Tensiometers need periodic maintenance.** NSW Government. 2000. Acessado em janeiro de 2013. <http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/resources/water/irrigation/scheduling/publications/tensiometer-maintenance>

MARÍN, J. **Notas de aula, Tema 7. Series temporales.** Universidad Carlos III de Madrid. Acessado pela internet. <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/EDescrip/tema7.pdf>. 2004.

INMET. Estações e dados. dados meteorológicos. estações automáticas. Itajai-SC. Acessado pela internet. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>

Anexos

Tabela 41 – Matriz de coeficientes de correlação para o primeiro período

	Pluviôgrafo	PZE-01 (8,65 m)	PZE-02 (6,40 m)	PZE-03 (3,90 m)	PZE-04 (8,60 m)	PZE-05 (7,20 m)	PZE-06 (3,70 m)	TENS-01 (1,00 m)	TENS-02 (2,00 m)	TENS-03 (0,50 m)	TENS-04 (3,00 m)	TENS-05 (1,00 m)	TENS-06 (2,00 m)	TENS-07 (1,00 m)	TENS-08 (2,00 m)	CC-01	CC-02	CC-03	CC-04	CRA-01	CRA-02	CRA-03	CRA-04	CRA-05	CRA-06	CRA-07	CRA-08	CRA-09	CRA-10	CRA-11	CRA-12	SG-01	SG-02/SG-03	SG-04	SG-05	SG-06/SG-07	SG-08	SG-09	SG-10/SG-11	SG-12	SG-13	SG-14/SG-15	SG-16								
Pluviôgrafo	1	-0,137	-0,179	-0,123	-0,099	-0,123	-0,120	-0,234	-0,084	-0,258	-0,035	-0,100	-0,225	-0,146	-0,187	0,243	0,277	0,189	0,270	0,017	-0,007	0,037	-0,179	-0,010	-0,009	0,094	-0,014	0,019	-0,046	-0,060	-0,016	-0,022	-0,073	-0,022	0,011	0,031	-0,044	-0,016	0,074	0,012	0,021	0,060	-0,010								
PZE-01 (8,65 m)		1	0,852	0,391	0,935	0,232	0,347	-0,226	-0,212	-0,109	0,052	-0,313	-0,024	0,013	-0,063	-0,001	-0,100	0,263	-0,014	-0,597	-0,737	-0,792	0,425	-0,755	-0,798	-0,181	0,769	-0,730	-0,675	-0,839	-0,613	-0,795	-0,548	0,299	0,365	0,797	-0,487	0,804	-0,724	0,834	0,499	-0,627	-0,728								
PZE-02 (6,40 m)			1	0,565	0,725	0,159	0,234	-0,270	-0,461	-0,154	-0,233	-0,252	-0,179	-0,102	-0,138	-0,157	-0,185	0,041	-0,152	-0,343	-0,510	-0,494	0,408	-0,477	-0,504	-0,099	0,538	-0,517	-0,567	-0,630	-0,350	-0,554	-0,349	0,158	0,252	0,633	-0,402	0,612	-0,443	-0,565	0,254	-0,350	-0,437								
PZE-03 (3,90 m)				1	0,284	0,545	0,562	-0,427	-0,732	-0,502	-0,603	-0,598	-0,561	-0,507	-0,402	0,187	0,198	0,185	0,218	-0,094	-0,117	-0,034	-0,281	-0,113	-0,110	-0,198	0,221	-0,136	-0,293	-0,400	-0,083	-0,203	-0,301	-0,046	0,026	0,335	-0,270	0,278	0,084	-0,180	-0,018	-0,108	-0,103								
PZE-04 (8,60 m)					1	0,241	0,362	-0,212	-0,103	-0,066	0,131	-0,312	0,044	0,065	-0,004	0,060	-0,056	0,311	0,032	-0,644	-0,779	-0,861	0,425	-0,807	-0,853	-0,104	0,805	-0,766	-0,688	-0,862	-0,675	-0,824	-0,604	0,331	0,382	0,804	-0,490	0,809	-0,740	0,868	0,540	-0,645	-0,762								
PZE-05 (7,20 m)						1	0,989	0,079	-0,043	-0,046	-0,023	-0,150	-0,038	-0,053	0,062	0,277	0,233	0,149	0,268	0,036	0,068	0,036	-0,298	0,061	0,040	-0,305	-0,067	0,109	0,132	-0,100	0,122	0,026	-0,083	-0,137	-0,131	-0,048	0,150	-0,046	0,086	0,033	-0,193	-0,007	0,057								
PZE-06 (3,70 m)							1	0,015	-0,059	-0,073	0,005	-0,202	-0,038	-0,057	0,043	0,310	0,249	0,232	0,298	-0,060	-0,071	-0,106	-0,233	-0,087	-0,107	-0,330	0,077	-0,036	0,000	-0,220	-0,016	-0,119	-0,148	-0,046	-0,022	0,092	0,036	0,099	-0,036	-0,113	-0,058	-0,129	-0,087								
TENS-01 (1,00 m)								1	0,773	0,883	0,576	0,711	0,772	0,825	0,722	-0,223	-0,217	-0,372	-0,232	0,096	0,384	0,286	0,004	0,427	0,362	-0,013	-0,532	0,468	0,726	0,393	0,445	0,468	0,151	-0,386	-0,482	-0,577	0,730	-0,532	0,140	0,419	-0,475	0,390	0,446								
TENS-02 (2,00 m)									1	0,818	0,892	0,696	0,898	0,852	0,738	-0,060	-0,120	-0,104	-0,096	0,000	0,105	-0,011	0,141	0,096	0,065	-0,049	-0,240	0,153	0,462	0,320	0,086	0,188	0,262	-0,058	-0,113	-0,365	0,449	-0,288	-0,123	0,157	-0,054	0,079	0,117								
TENS-03 (0,50 m)										1	0,707	0,787	0,924	0,930	0,802	-0,160	-0,180	-0,221	-0,175	0,059	0,146	0,062	0,176	0,183	0,143	-0,055	-0,309	0,187	0,480	0,320	0,176	0,236	0,276	-0,128	-0,173	-0,353	0,476	-0,301	-0,011	0,228	-0,173	0,211	0,250								
TENS-04 (3,00 m)											1	0,532	0,863	0,797	0,672	0,108	0,007	0,144	0,067	-0,118	-0,165	-0,284	0,203	-0,189	-0,213	-0,200	0,053	-0,148	0,185	0,062	-0,183	-0,099	0,252	0,197	0,121	-0,059	0,200	0,021	-0,349	-0,118	0,219	-0,181	-0,148								
TENS-05 (1,00 m)												1	0,714	0,699	0,598	-0,209	-0,193	-0,317	-0,221	0,159	0,296	0,252	0,253	0,348	0,324	-0,065	-0,486	0,330	0,529	0,592	0,369	0,408	0,541	-0,239	-0,199	-0,520	0,504	-0,461	0,028	0,400	-0,224	0,366	0,372								
TENS-06 (2,00 m)													1	0,932	0,829	-0,056	-0,110	-0,049	-0,085	-0,010	-0,027	-0,113	0,213	-0,013	-0,040	-0,161	-0,126	0,005	0,319	0,203	-0,027	0,054	0,290	0,023	0,016	-0,197	0,306	-0,133	-0,160	0,057	0,038	0,016	0,055								
TENS-07 (1,00 m)														1	0,828	-0,140	-0,181	-0,149	-0,159	-0,066	0,003	-0,088	0,238	0,029	-0,013	-0,058	-0,159	0,050	0,365	0,160	0,038	0,086	0,155	-0,044	-0,093	-0,215	0,403	-0,152	-0,160	0,061	-0,049	0,054	0,083								
TENS-08 (2,00 m)															1	-0,093	-0,118	-0,135	-0,111	0,065	0,066	0,017	0,109	0,115	0,081	-0,130	-0,218	0,124	0,392	0,224	0,119	0,160	0,218	-0,101	-0,123	-0,271	0,397	-0,226	-0,032	0,152	-0,133	0,143	0,166								
CC-01																1	0,973	0,907	0,991	-0,055	-0,200	-0,229	-0,552	-0,267	-0,256	-0,374	0,173	-0,278	-0,165	-0,253	-0,340	-0,252	0,057	0,291	0,295	0,241	-0,249	0,224	-0,003	-0,153	0,343	-0,201	-0,207								
CC-02																	1	0,859	0,980	0,057	-0,093	-0,095	-0,612	-0,149	-0,130	-0,326	0,057	-0,172	-0,097	-0,171	-0,241	-0,151	0,098	0,197	0,241	0,155	-0,203	0,124	0,137	-0,033	0,238	-0,077	-0,087								
CC-03																		1	0,894	-0,221	-0,506	-0,527	-0,332	-0,595	-0,568	-0,374	0,500	-0,602	-0,489	-0,500	-0,654	-0,587	-0,070	0,464	0,584	0,566	-0,539	0,552	-0,255	-0,474	0,645	-0,461	-0,530								
CC-04																			1	0,566	-0,170	-0,186	-0,579	-0,238	-0,228	-0,368	0,147	-0,249	-0,152	-0,251	-0,314	-0,231	0,044	0,265	0,264	0,229	-0,241	0,207	0,025	-0,132	0,316	-0,169	-0,179								
CRA-01																				1	0,566	0,657	-0,309	0,634	0,689	0,049	-0,629	0,572	0,457	0,642	0,498	0,594	0,622	-0,257	-0,159	-0,574	0,332	-0,612	0,762	0,728	-0,470	0,577	0,679								
CRA-02																					1	0,918	-0,472	0,946	0,941	0,165	-0,915	0,940	0,858	0,750	0,891	0,939	0,376	-0,524	-0,715	-0,901	0,750	-0,917	0,770	0,923	-0,853	0,727	0,909								
CRA-03																						1	-0,449	0,957	0,974	0,179	-0,914	0,928	0,791	0,795	0,867	0,929	0,458	-0,527	-0,617	-0,872	0,648	-0,902	0,860	0,950	-0,827	0,785	0,926								
CRA-04																							1	-0,413	-0,398	0,067	0,426	-0,433	-0,405	-0,126	-0,306	-0,378	-0,039	0,279	0,321	0,336	-0,260	0,404	-0,613	-0,461	0,366	-0,345	-0,453								
CRA-05																								1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971								
CRA-06																									1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971							
CRA-07																										1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971						
CRA-08																											1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971					
CRA-09																												1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971				
CRA-10																													1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971			
CRA-11																														1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971		
CRA-12																															1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971	
SG-01																																1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-0,752	-0,945	0,792	-0,968	0,802	0,972	-0,912	0,808	0,971
SG-02/SG-03																																		1	0,986	0,192	-0,969	0,982	0,892	0,804	0,947	0,985	0,419	-0,602	-						

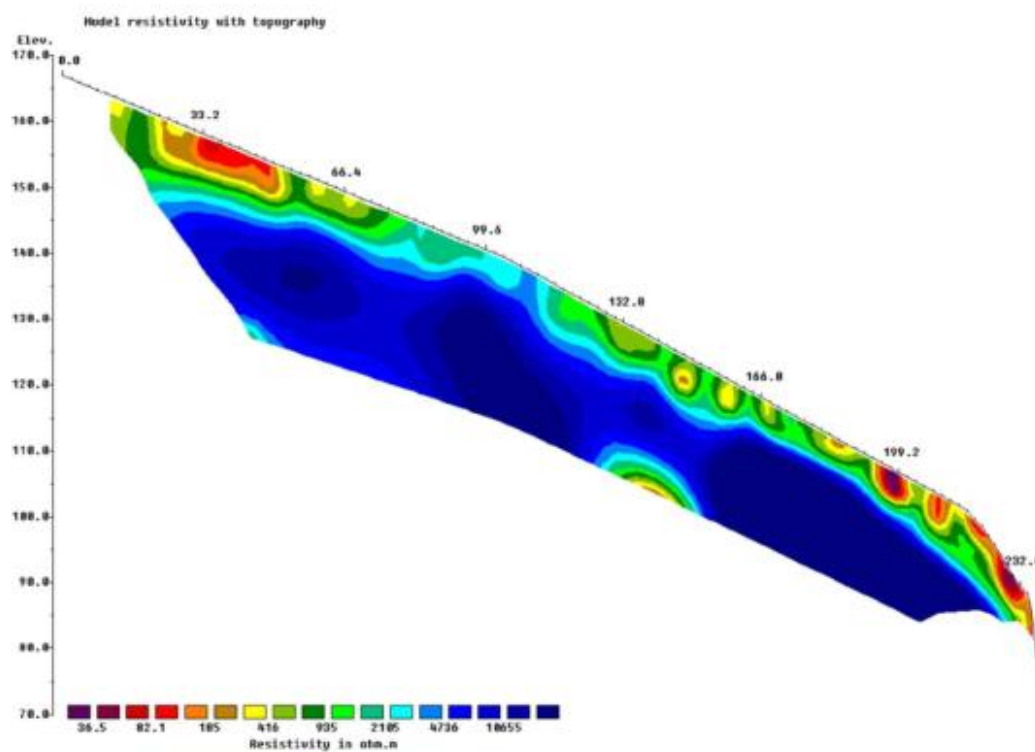


Figura 110 – Imageamento elétrico do CE 01. Fonte: Tecgeofísica (2012)

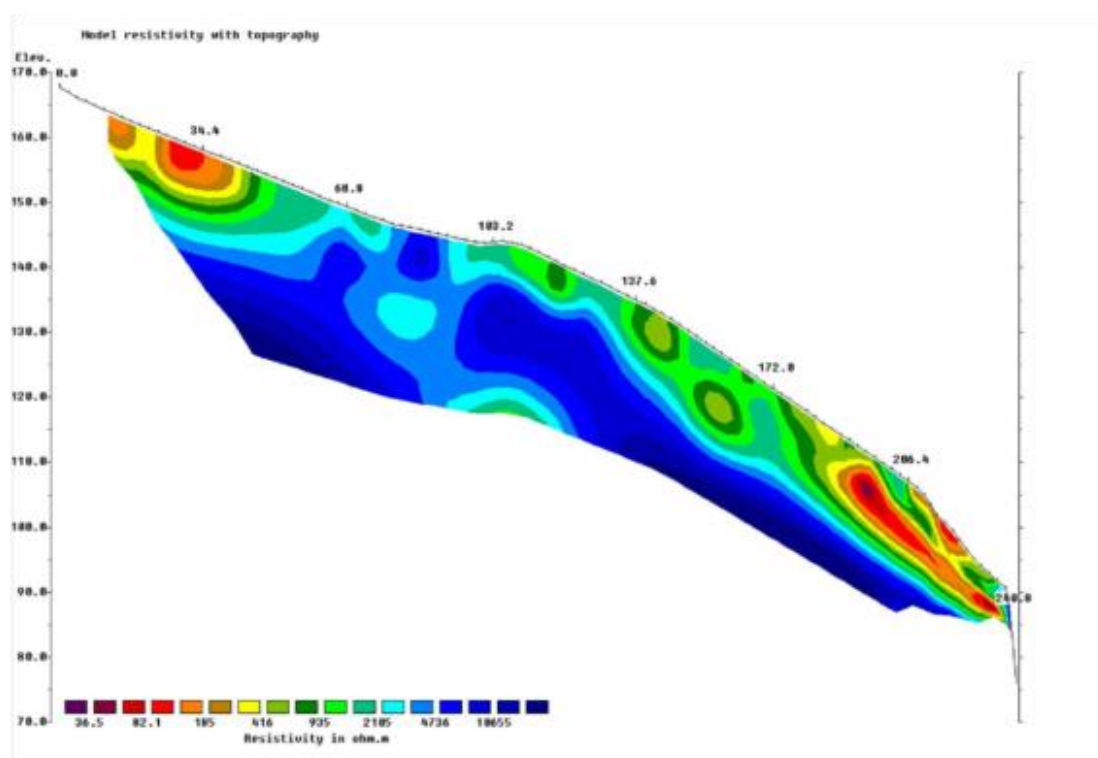


Figura 111 – Imageamento elétrico do CE 02. Fonte: Tecgeofísica (2012)

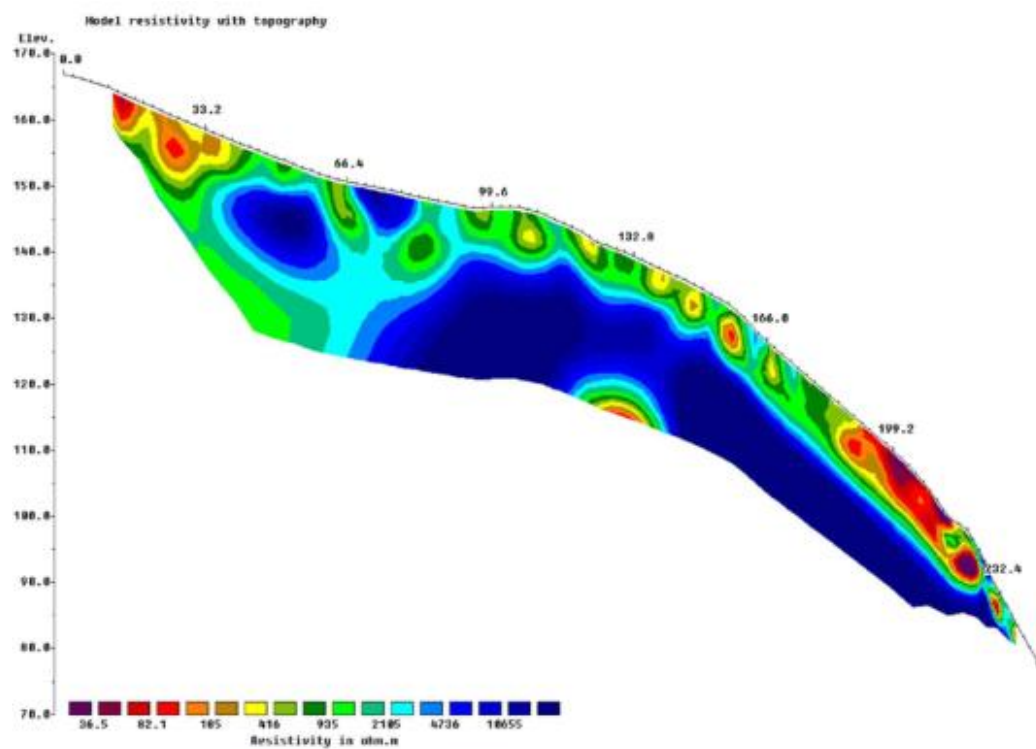


Figura 112 – Imageamento elétrico do CE 03. Fonte: Tecgeofísica (2012)

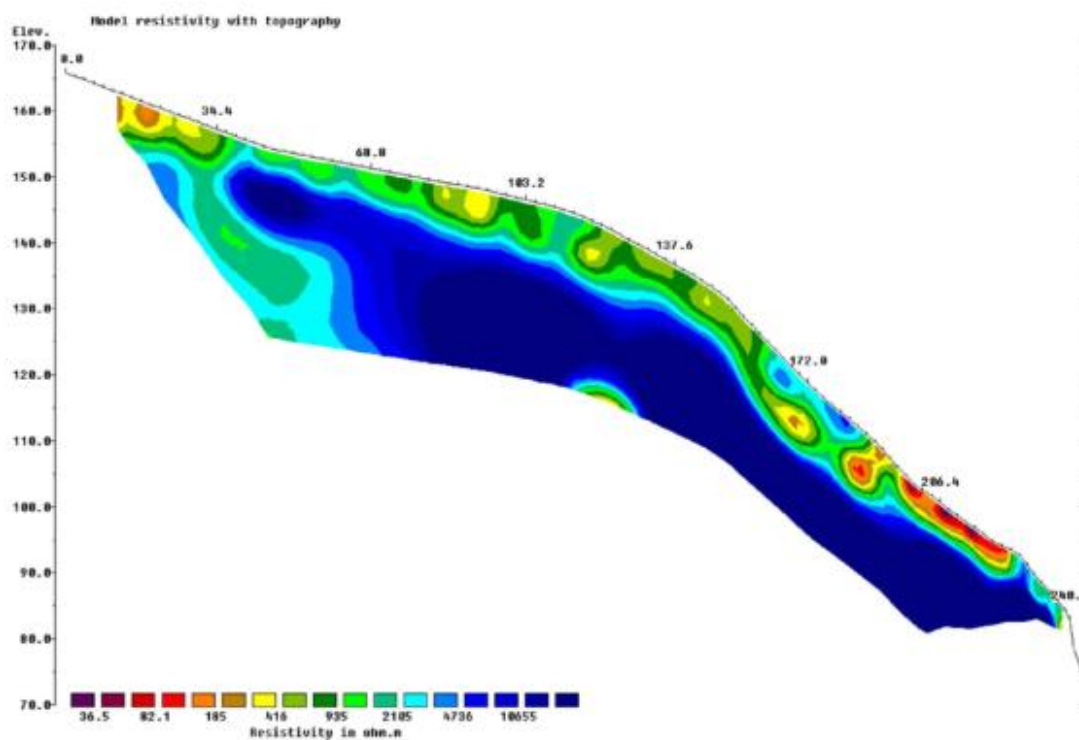


Figura 113 – Imageamento elétrico do CE 04. Fonte: Tecgeofísica (2012)

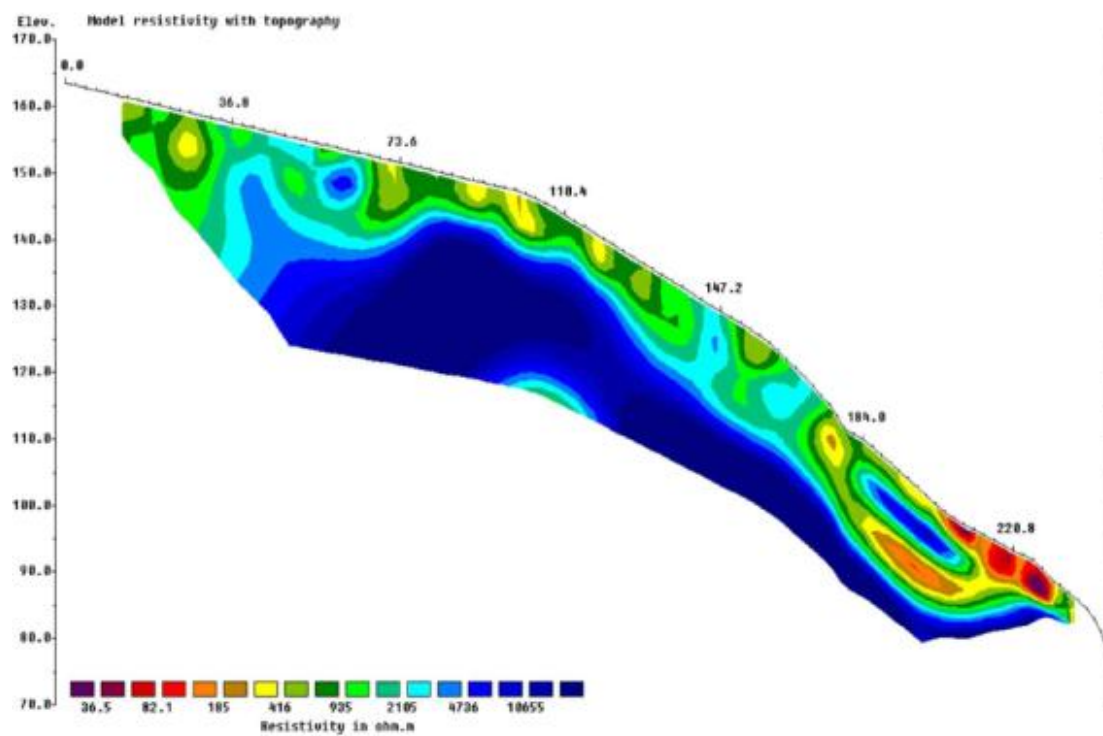


Figura 114 – Imageamento elétrico do CE 05. Fonte: Tecgeofísica (2012)

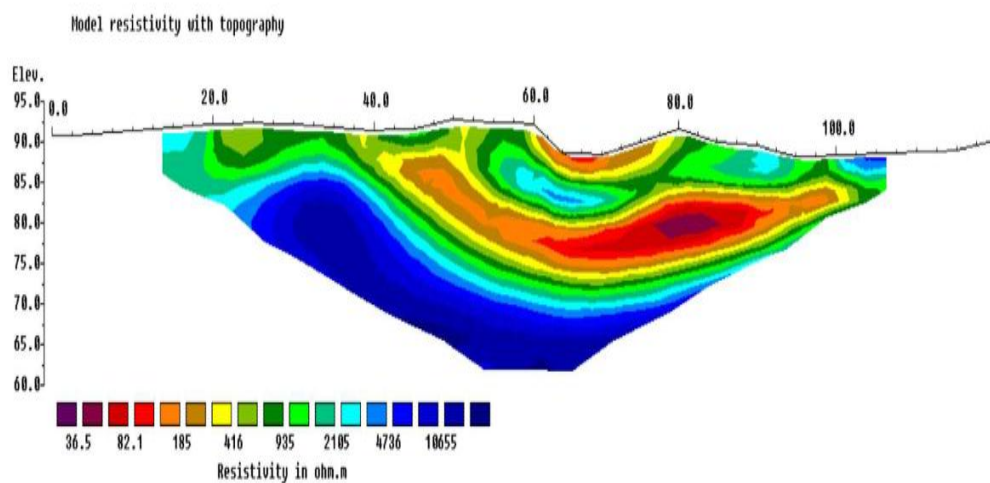


Figura 115 – Imageamento elétrico do CE 06. Fonte: Tecgeofísica (2012)



Figura 116 – Localização dos caminhamentos elétricos. Fonte: Tecgeofísica (2012)